DOI: 10.18721/JPM.11202
УДК 621.383.522

СВЯЗЬ ОБЪЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ С ВЫСОТОЙ ЗАРЯДОВОГО БАРЬЕРА В ДИНАМИЧЕСКОМ *p–i–n*-ФОТОДИОДЕ

Д.Б. Дюбо, О.Ю. Цыбин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проанализированы характеристики микроэлектронного динамического операционного *p*—*i*—*n*-фотодетектора, обусловленные взаимодействием объемных эффектов и адсорбированных частиц на поверхности пленки оксида кремния. Рассмотрены температурные характеристики в режиме светового облучения, аномальные характеристики температурного гистерезиса, процессы в адсорбированном слое и перенос носителей заряда через потенциальный барьер в объеме кремниевой подложки. Обнаружено, что чувствительность прибора по отношению к фототоку нелинейно зависит от температуры. Предложена теоретическая модель, которая связывает процессы термо- и фотогенерации носителей заряда с параметрами потенциальных барьеров, зависящими от температуры и от модуляции зарядом подвижных носителей. Выявлены эффекты, обусловленные формированием поверхностных зарядов при осаждении частиц из внешнего окружения на пленке диоксида кремния, на элементах оптической системы, например, при работе во влажной среде или при разгерметизации прибора. Найдены условия и режимы, оптимальные для проведения измерений фототока.

Ключевые слова: динамический *p*—*i*—*n*-фотодиод; температурный гистерезис; объемный эффект; зарядовый барьер

Ссылка при цитировании: Дюбо Д.Б., Цыбин О.Ю. Связь объемных и поверхностных эффектов с высотой зарядового барьера в динамическом *p*—*i*—*n*-фотодиоде // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 16 – 25. DOI: 10.18721/JPM.11202

THE RELATION OF VOLUME AND SURFACE EFFECTS WITH A CHARGE BARRIER HEIGHT IN A DYNAMIC *p–i–n*-PHOTODYODE

D.B. Dyubo, O.Yu. Tsybin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The characteristics of the microelectronic dynamic operational *p*—*i*—*n*-photodetector have been analyzed. These features are determined by the interaction of volume effects with particles adsorbed on the SiO_2 film surface. The temperature characteristics in the visible light irradiation regime, the anomalous characteristics of the temperature hysteresis, the processes in the adsorbed layer and the charge carriers' transport through the potential barrier in the Si substrate bulk were considered. The photocurrent sensitivity of the device was found to depend nonlinearly on temperature. We proposed a theoretical model that related the processes of thermal- and photo-generation of the charge carriers with the potential barrier parameters. The effects resulted from the formation of the surface charges were revealed. The optimal conditions and regimes for measuring the photocurrent were determined.

Key words: dynamic *p*—*i*—*n*-diode; temperature hysteresis; volume effect; charge barrier

Citation: D.B. Dyubo, O.Yu. Tsybin, The relation of volume and surface effects with a charge barrier height in a dynamic *p*—*i*—*n*-photodyode, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (2) (2018) 16 – 25. DOI: 10.18721/JPM.11202

Введение

Эффективные фотодетекторы электромагнитных излучений в видимой спектральной области широко востребованы в науке и технике. Высокие требования предъявляются к их чувствительности, стабильности, уровню шума, габаритам и другим характеристикам. Разработка полупроводниковых приборов, отвечающих таким требованиям, представляет собой актуальную задачу электроники.

Вакуумные фотоэлектронные умножители обладают высокой чувствительностью, но не представлены в микроэлектронном исполнении и обладают рядом недостатков: имеют высокий уровень шума, узкий динамический диапазон, не обеспечивают режима получения двумерного изображения; кроме того, их фотокатоды подвержены деградации. Для них также характерны недостаточные ударопрочность и вибростойкость, и еще они требуют высоковольтных источников питания.

Умножители электронов на микроканальных пластинах имеют меньшие размеры, но их характеристики нестабильны при вибрациях и неустойчивы к ионизирующему излучению; эти устройства также требуют высокого напряжения питания.

Обычные полупроводниковые фотоприемники и ПЗС-матрицы также не лишены недостатков: требуют применения высокочувствительных широкополосных предусилителей и интеграторов сигналов. Но такие схемы вносят дополнительно высокий уровень шума, допускают потери слабых сигналов.

Новые *p*—*i*—*n*-фотодиоды [1] оснащены металло-оксидным полупроводниковым (КМОП) затвором, размещенным вокруг встроенной обедненной *p*-области кремния (КМОП – комплементарная структура металл – оксид – полупроводник). Спектральная чувствительность диода достаточно высока в видимом диапазоне электромагнитных волн (400 – 800 мкм). Прибор работает в динамическом режиме с импульсным напряжением, переключающим из обратного смещения напряжения в прямое. Измеряемой величиной, которая характеризует поток фотонов, служит не амплитуда подаваемого на устройство сигнала, а время переключения, которое зависит от энергетической дозы поглощенного света. В исходном состоянии и в течение времени задержки τ после переключения электроны и дырки удерживаются электростатическими потенциальными барьерами, соответствующими больцмановскому равновесию диффузии и дрейфа вблизи границ областей обеднения. После переключения из обратного смещения в прямое прибор в течение определенного времени задержки τ продолжает находиться в закрытом состоянии, причем до тех пор, пока подвижные носители заряда остаются запертыми потенциальными барьерами. Рост инжектируемого тока происходит при облучении фотонами, которые генерируют в кремнии электронно-дырочные пары. Время переключения τ определяется динамикой нейтрализации пространственного заряда барьеров при инжекции носителей заряда: электронов в область катода и дырок в область анода. Дополнительный ток инжекции создают носители, произведенные в процессе термогенерации. Суммарный ток обеспечивает заполнение области обеднения и нейтрализацию барьеров за время τ. По мере протекания тока и заполнения областей обеднения потенциальные барьеры становятся более низкими и узкими. Переключение из состояния с низкой амплитудой выходного тока в сильноточное состояние происходит с крутым фронтом, предположительно, вследствие туннельного пробоя через сужающийся барьер, причем этот процесс усиливается положительным эффектом обратной связи за счет возвратного переноса дырок к катоду.

Предполагается, что новые *p*—*i*—*n*-фотодиоды перспективны для применения в системах регистрации слабых излучений

в видимом спектральном диапазоне, в том числе в люминометрах, анализаторах спектра и других фоточувствительных приборах [1, 2].

Однако характеристики прибора и физические процессы, лежащие в основе его работы, пока изучены недостаточно. Температурные характеристики необходимы для правильного описания процессов в приборе, а также для определения рабочих условий и параметров его применения.

В работе [2] измерены температурные зависимости времени самопереключения диода в отсутствие внешнего освещения. Предложена также теоретическая модель протекания тока, позволяющая интерпретировать экспериментальные характеристики. Авторы работы приняли допущение, что в режиме самопереключения в процессах нейтрализации могут участвовать только носители, способные преодолеть потенциальный барьер за счет тепловой энергии. При отсутствии внешнего облучения плотность тока J_0 термогенерированных носителей заряда, протекающего над потенциальным барьером, оценивалась путем интегрирования функции Ферми по энергии выше барьера E_b. В результате было получено соотношение, определяющее зависимость нейтрализованной части $Q(t)$ полного заряда барьера от времени t, температуры T и текущего значения высоты барьера $E_b(t)$:

$$Q(t) \sim \int_0^t dt \cdot T^2 \exp(-E_b(t) / kT). \qquad (1)$$

Значение высоты барьера $E_b(t)$ зависит от времени по двум причинам: во-первых, ввиду нейтрализации заряда термотоком и, во-вторых, вследствие снижения высоты барьера зарядом термогенерированных носителей. Быстрое переключение диода происходит, когда значение $Q(t)$ достигает критического значения Q_c при $t = \tau$. Эта простая модель позволила достаточно точно аппроксимировать экспериментальные температурные зависимости, но оставила неопределенными температурные характеристики переключения при освещении фотодиода потоком фотонов и адсорбции на фоточувствительном слое частиц из внешнего окружения.

Цель данной работы состояла в дальнейшем развитии модели процессов, происходящих в приборе и зависящих от температуры, в определении механизмов влияния внешних факторов на эти процессы, в том числе изменения концентрации адсорбированного слоя на поверхности пленки оксида кремния в наружной области между катодом и затвором.

Методы исследования

Диод на время измерений помещали в светоизолированный термостат, в котором изменяли и контролировали температуру в интервале от 275 до 305 K при естественной влажности. Температуру изменяли в квазиравновесных условиях: медленно (менее 1 град/мин) и небольшими шагами; на каждом шаге диод выдерживали длительное время для установления нового значения температуры так, чтобы скорость изменения температуры не влияла на получаемые результаты. При переходе в режим облучения потоком фотонов регулировали внешнюю освещенность поверхности диода видимым дневным светом путем изменения размера затвора-диафрагмы в стенке термостата. Чтобы исследовать влияние влажности на прибор, его не герметизировали.

В экспериментах не измеряли абсолютного значения интенсивности потока фотонов, так как для целей исследования было достаточно получать только относительные значения. Ненулевой минимальный уровень освещенности соответствовал режиму при комнатной температуре и минимальном фототоке, который не был заметен на фоне тока термогенерации. Увеличение интенсивности потока производили в динамическом диапазоне до значений, превышающих указанный уровень на один-два порядка.

Для питания диода и измерений использовали программируемую управляющую схему с встроенным микроэлектронным чипом. Время самопереключения диода и время его переключения при освещении определяли по отсчетам управляющей схемы и одновременно контролировали циф-

ровым осциллографом ТДХ-520.

Для компьютерного моделирования процессов в диоде использовали программу Comsol, с помощью которой определяли объемное распределение потенциала. При этом задавали геометрические параметры диода, значения концентрации примесей, напряжений на электродах диода, а также учитывали наличие адсорбированных молекул воды на наружной поверхности пленки оксида кремния в области между катодом и затвором.

Результаты экспериментального исследования и их обсуждение

Типичные зависимости нормированного обратного времени переключения диода (в логарифмическом масштабе) от температуры представлены на рис. 1 в трех режимах: самопереключение термогенерированными носителями и переключение в двух режимах при освещении постоянным (не зависящим от времени) потоком фотонов (Φ = const). Нормировочное значение максимального времени τ_{max} принималось постоянным. Очевидно (см. рис. 1), что кривые, полученные при облучении фотонами, отличаются от таковых, зарегистрированных в режиме термогенерации, при котором допустима аппроксимация формулой (1). Зависимости при фотогенерации носителей заряда не представляются линейными смещениями кривой *1*. Поведение величины τ_{max} / τ в зависимости от температуры T при облучении предельно слабым, на пороге чувствительности прибора, потоком Φ_2 на кривой *2* свидетельствует о конкуренции двух типов генерации. Графики зависимостей *2* и *3* остаются приблизительно экспоненциальными с

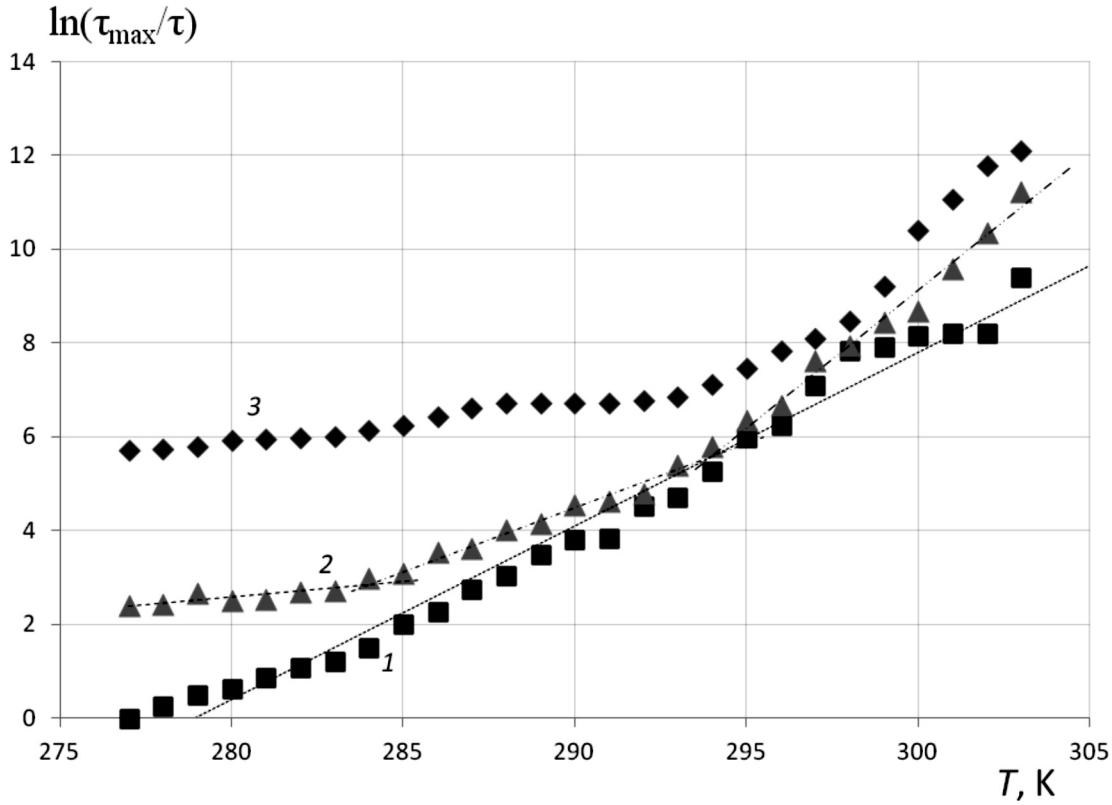


Рис. 1. Температурные зависимости логарифма обратного времени переключения диода без освещения (*1*) и при освещении (*2*, *3*) видимым светом с различным потоком фотонов Φ: *1* – носители заряда генерируются термически ($\Phi_1 = 0$); *2* – случай конкуренции двух типов генерации для предельно малого потока фотонов ($\Phi_2 > 0$), *3* – преобладает процесс фотогенерации, но возникает термогенерация при повышенных температурах ($\Phi_3 > \Phi_2$); τ_{max} = const

разными показателями экспоненты на отдельных участках: низким (около 0,49) при преобладании фототока над током термогенерации, значительным в температурной области $T > 285$ K; небольшим (около 2,11) при $285 < T < 295$ K и, наконец, увеличенным (около 4,61) при преобладании тока термогенерации, когда $T > 295$ K.

При увеличении фототока (кривая *3* на рис. 1) показатель экспоненты остается приблизительно постоянным и малым (около 0,52) при $T < 295$ K, т. е. время переключения в этом режиме слабее зависит от температуры, чем в режиме термогенерации при нулевом освещении. При увеличении температуры в область $T > 295$ K наклон зависимости *3* значительно возрастает, что указывает на увеличенный вклад термотока. Поток фотонов Φ_2 выбран предельно малым по интенсивности, но все же регистрируемым по отношению к термотоку; для него отношение сигнал/шум SNR определяется следующим образом:

$$\mathrm{SNR} = P_{ph}/P_{th},$$

где P_{ph}, P_{th} – мощности полного сигнала фотогенерации и сигнала термогенерации, соответственно.

Значение величины SNR близко к 1 при температуре $T > 290$ K; SNR > 1 при $T < 290$ K, и данный участок на его температурной зависимости можно считать оптимальным для использования фотодиода. Однако, как будет показано ниже, имеются ограничения и со стороны низких температур.

Причины, по которым происходит изменение температурной зависимости времени переключения при экспозиции фотонами, можно объяснить неравновесной генерацией электронно-дырочных пар, получающих начальную избыточную энергию по отношению к температуре решетки в кремниевой подложке. Для фотогенерированных носителей в области выше равновесной термодинамической энергии kT происходит снижение эффективной высоты удерживающего потенциального барьера. Протекание суммарного тока термогенерации и фотогенерации в этом случае можно определить соотношением, уточняющим формулу (1):

$$Q(\tau) \sim \int_0^{\tau} dt \cdot T^2 \exp\left(\frac{-E_b(t) - \Delta E_b(\Phi, T)}{kT}\right), \quad (2)$$

где $\Delta E_b(\Phi, T)$ – эффективное снижение высоты барьера за счет нейтрализации объемного заряда фотогенерированными носителями (Φ – доза облучения).

Фототок, протекающий над барьером, пропорционален дозе облучения, т. е. $I_\Phi(\Phi) \sim \mathrm{const} \cdot \Phi$.

В модели, соответствующей формуле (2), рассмотрение фототока полностью заложено в изменение высоты барьера. Эта модель, в которой учитываются вклад фототока в нейтрализацию заряда барьера, модуляция высоты барьера зарядом фотогенерированных носителей и зависимость высоты барьера от температуры, позволила точнее интерпретировать зависимости, представленные на рис. 1. При разбиении на участки экспериментальные кривые хорошо аппроксимируется экспонентами с разными показателями. В этом проявляется, вероятно, зависимость изменения эффективной высоты барьера $\Delta E_b(\Phi, T)$ от температуры. Параметры барьеров были нами определены по зависимостям на рис. 1 для режима напряжений на электродах диода, соответствующих вычислениям по программе Comsol (см. ниже данные на рис. 3). Полученные значения параметров в формуле (2) находятся в согласии как с принятой моделью, так и с результатом компьютерных вычислений:

$$W_1 = E_b = 2{,}62 \text{ В};$$
$$W_2 = E_b + \Delta E_b(\Phi,\ T_{<295}) = 0{,}52 \text{ В};$$
$$\Delta E_b(\Phi, T_{<295}) = -2{,}10 \text{ В},$$

где W_1, W_2 – значения высоты барьера при $\Phi = 0$ независимо от температуры и при $\Phi = \Phi_3$ для температурной области $T < 295$ K, соответственно; $\Delta E_b(\Phi, T_{<295})$ – изменение высоты барьера при условиях, обозначенных для величины W_2.

Для дальнейшего уточнения температурных характеристик в области пониженных температур мы производили измерения с циклическими процессами охлаждения и нагрева. Впервые гистерезис

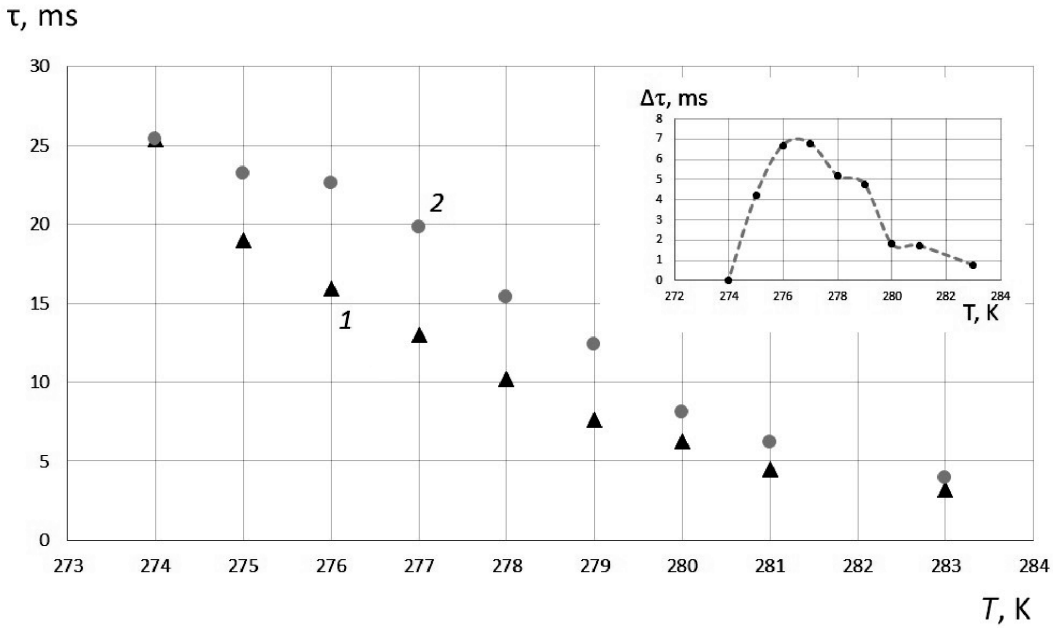


Рис. 2. Температурные зависимости времени самопереключения диода при начальном охлаждении (*1*) и последующем нагреве (*2*). На вставке по оси ординат отложены значения разности кривых *2* и *1*

наблюдался в диапазоне температур около 270 – 280 K – вблизи расчетной точки росы. Как можно видеть на рис. 2, циклу нагрева соответствовало время переключения диода, увеличенное по сравнению с временем переключения, соответствующим циклу охлаждения. Причиной наблюдаемого гистерезиса может являться зависимость концентрации адсорбированных частиц от температуры. Действительно, при квазиравновесных условиях выравниваются потоки частиц, падающих на поверхность и уходящих с нее. Однако концентрация частиц, удерживаемых на поверхности за счет сил адсорбции, зависит от предыстории изменения температуры даже в квазиравновесных процессах. При повышении температуры процессы определяются повышенной концентрацией адсорбата, полученной при более низкой температуре.

Естественно, что при пониженной температуре происходила конденсация паров воды из окружающего атмосферного объема на слое диоксида кремния и нарастала достаточно адсорбированная поверхностная пленка, состоящая из молекул воды. При нагреве эта пленка постепенно утончалась, изменяя при этом время переключения диода, но с другой закономерностью, по сравнению с температурной зависимостью этой величины при охлаждении.

Возможная схема проявления процессов гистерезиса в измеряемых параметрах диода состоит в том, что поверхностные заряды в пленке искажают распределение потенциала и высоту барьеров на траекториях движения носителей заряда в ближней к поверхности области в кремниевой подложке. Вопрос о зарядовом состоянии адсорбированного слоя выглядит сложным, и в известных литературных источниках представлен мало. Причиной возникновения заряженного слоя у поверхности может быть разделение зарядов в пленке ввиду различия их мобильности [3, 4]. Протоны имеют аномально большую подвижность и способны за счет этого производить ионы H_3O^+ и его стабильные комплексы [5 – 7]. Кроме того, такие ионы могут образовываться на поверхности в ходе реакции самоионизации воды [3 – 5]:

$$2H_2O = H_3O^+ + OH^-.$$

Еще одним активным ионом является

катион NO^+, способный создавать сильные связи с молекулами воды и, соответственно, стабильные кластеры $NO^+ + (H_2O)_n$ [8].

Связь молекул воды с поверхностью и образование соответствующих ионов в пленке можно трактовать также в терминах простого кислотно-основного взаимодействия по Льюису [9, 10]: молекула воды выступает в роли электронного донора (Льюисово основание), а субстрат – в роли электронного акцептора (Льюисова кислота).

При том, что детали этого явления не определены, сам факт зарядки в присутствии молекул воды соответствует современным представлениям об адсорбированном слое. Заряды на поверхности генерируют электрическое поле, изменяющее вид потенциальных барьеров в кремниевой основе фотодиода. Подобные явления известны в полупроводниковых биосенсорах [11].

Для дальнейшей интерпретации результатов применялось компьютерное моделирование с использованием пакета Comsol. Нами были вычислены значения высоты и модуляции потенциальных барьеров при заданных допустимых значениях поверхностных и объемных зарядов. Принималось, что молекулярная пленка имеет малый заряд с поверхностной концентрацией, соответствующей приблизительно 10%-ой ионной компоненте в нейтральном ленгмюровском монослое, что можно считать близким к условиям измерений.

Нами также был определен профиль электростатического потенциала барьеров, удерживающих объемный заряд в режиме переключения *p*–*i*–*n*-диода со встроенным металло-оксидным полупроводниковым затвором, размещенным вокруг *p*-области. При моделировании получены статические пространственные распределения значений потенциала для различных температур и пленок адсорбированных частиц на наружной поверхности пленки SiO_2 в области между катодом и затвором. На рис. 3 показано распределение потенциала при прямом смещении (анод и затвор имеют положительный потенциал относительно катода), вычисленное в плоскости, находящейся на расстоянии десятых долей микрона от

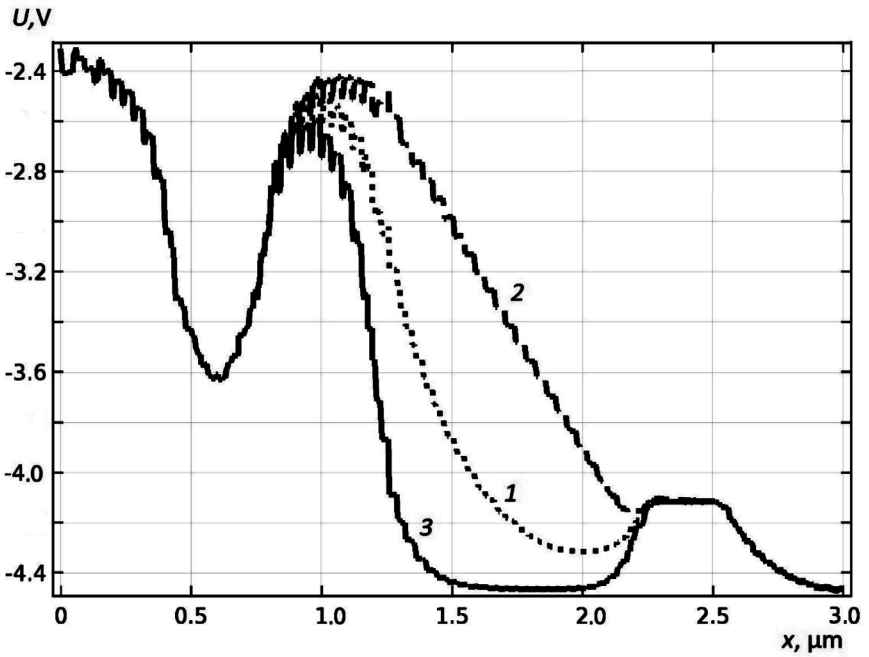


Рис. 3. Расчетные распределения статического потенциала вдоль траектории движения носителей заряда при различных зарядовых состояниях адсорбированного слоя:
1 – в отсутствие адсорбированной пленки; *2*, *3* – при наличии такой пленки, создающей соответственно положительно и отрицательно заряженные слои (значение поверхностного заряда было принято равным 0,01 Кл/м^2)

верхней поверхности диода, где проходят возможные траектории частиц. Распределение потенциала вычислено вдоль траектории движения носителей заряда.

Очевидно (см. рис. 3), что существуют электростатические барьеры, захватывающие заряды в потенциальных ямах на траектории движения носителей. Величина напряженности электрического поля быстро снижается за пределами области обеднения. Из-за отсутствия достаточно сильного электрического поля, носители заряда малоподвижны. Молекулярная пленка создает заряженный слой у поверхности, который своим электрическим полем изменяет высоту и форму потенциальных барьеров, управляя протеканием нейтрализующих потоков носителей заряда. Расчеты высоты барьера на основе данных рис. 3 были использованы и приведены выше при оценках температурных зависимостей и параметров по формуле (2), а также использованы для определения отношения высоты барьера с поверхностной пленкой E_{bs} к высоте барьера без пленки E_b:

$$\gamma = E_{bs} \,/\, E_b \cong 1,2.$$

Заключение

Проведенное экспериментальное и теоретическое исследование привело к следующим результатам:

в динамическом режиме определены температурные характеристики p–i–n-диода со встроенным металло-оксидным полупроводниковым затвором в условиях, близких к практическому использованию прибора, т. е. при измерении фототока и одновременном воздействии на объект внешнего атмосферного окружения;

обнаружено, что чувствительность прибора по отношению к фототоку нелинейно зависит от температуры – имеются участки с различной крутизной температурных характеристик;

предложена теоретическая модель, которая связывает процессы термо- и фотогенерации носителей заряда с изменением высоты потенциальных барьеров, зависящей от температуры и от модуляции зарядом подвижных носителей;

найдены условия и режимы, оптимальные для проведения измерений фототока;

обнаружены эффекты, которые могут проявляться вследствие формирования поверхностных зарядов при осаждении частиц из внешнего окружения на пленке диоксида кремния, на элементах оптической системы, например при работе во влажной среде или при разгерметизации прибора.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволили уточнить динамические сценарии процессов в приборе, а также оценить области и рабочие параметры его возможного применения в измерительной аппаратуре. Выявленные эффекты могут быть учтены при разработке технических устройств с новым фотодетектором.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам компании ActLight SA (г. Лозанна, Швейцария), за предоставление образца p–i–n-диода для проведения исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Okhonin S., Gureev M., Sallin D., Appel J., Koukab A., Kvasov A., Pastre M., Polzik E.S., Tagantsev A.K., Uddegard F., Kayal M.** A dynamic operation of a PIN photodiode // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. No. 3. P. 031115.

2. **Dyubo D., Tsybin O.Y.** Nano communication device with an embedded molecular film. Electromagnetic signals integration with dynamic operation photodetector // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2017. Vol. 10531. Pp. 206–213.

3. **Цыбин О.Ю., Григорьев А.В.** Исследование молекулярной десорбции из адсорбированного слоя остаточных газов электродинамическим и лазерным методами // Вакуумная техника и технология. 2007. Т. 17. № 2. С. 73–81.

4. **Цыбин О.Ю.** Электродинамическая десорбция/ионизация частиц с полупроводниковых подложек // Вакуумная техника и технология. 2011. Т. 21. № 1. С. 17–20.

5. **Voeikov V.L.** Biological significance of active oxygen-dependent processes in aqueous systems // G.H. Pollack, I.L. Cameron, D.N. Wheatley (Eds.)

Water and the Cell. Dordrecht: Springer, 2006. Pp. 285–298.

6. **Camaioni D.M., Schwerdtfeger C.A.** Accurate experimental values for the free energies of hydration of H^+, OH^-, and H_3O^+// J. Phys. Chem. A. 2005. Vol. 109. No. 47. Pp. 10795–10797.

7. **Agmon N.** Mechanism of hydroxide mobility // Chem. Phys. Lett. 2000. Vol. 319. No. 3-4. Pp. 247–252.

8. **Hammam E., Lee E.P.F., Dyke J.M.** *Ab initio* molecular orbital calculations on NO^+ $(H_2O)_n$ cluster ions. Part I: Minimum-energy structures and possible routes to nitrous acid formation // J. Phys. Chem. A. 2000. Vol. 104. No. 19. Pp. 4571–4580.

9. **Кузнецов А.М.** Адсорбция паров воды на металлических поверхностях // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 5. С. 45–51.

10. **Sun K.-H., Silverman A.** Lewis acid-base theory applied to glass // J. Am. Cer. Soc. 1945. Vol. 28. No. 1. Pp. 1–32.

11. **Barbaro M., Bonfiglio A., Raffo L.** A charge-modulated FET for detection of biomolecular processes: conception, modeling, and simulation// IEEE Transactions on Electron Devices. 2006. Vol. 53. No. 1. Pp. 158–166.

Статья поступила в редакцию 12.01.2018, принята к публикации 17.04.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЮБО Дмитрий Борисович – *аспирант кафедры физической электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.*

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

doobinator@rambler.ru

ЦЫБИН Олег Юрьевич – *доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.*

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

otsybin@rphf.spbstu.ru

REFERENCES

[1] **S. Okhonin, M. Gureev, D. Sallin, et al.,** A dynamic operation of a PIN photodiode, Appl. Phys. Lett. 106 (3) (2015) 031115.

[2] **D. Dyubo, O.Y. Tsybin,** Nano communication device with an embedded molecular film. Electromagnetic signals integration with dynamic operation photodetector, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 10531 (2017) 206–213.

[3] **O.Yu. Tsybin, A.V. Grigoryev,** Issledovaniye molekulyarnoy desorbtsii iz adsorbirovannogo sloya ostatochnykh gazov elektrodinamicheskim i lazernym metodami [Investigation of the molecular desorption from the adsorbed residual gases layer using electrodynamic and laser methods], Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya. 17(2) (2007) 73–81.

[4] **O.Yu. Tsybin,** Elektrodinamicheskaya desorbtsiya/ionizatsiya chastits s poluprovodnikovykh podlozhek [Electrodynamic desorption / ionization of the particles from the semiconductor substrates], Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya. 21 (1) (2011) 17–20.

[5] **V.L. Voeikov,** Biological significance of active oxygen-dependent processes in aqueous systems, In: G.H. Pollack, I.L. Cameron, and D.N. Wheatley (Eds.) Water and the Cell, Springer, Dordrecht (2006) 285–298.

[6] **D.M. Camaioni, C.A. Schwerdtfeger,** Accurate experimental values for the free energies of hydration of H^+, OH^-, and H_3O^+, J. Phys. Chem. A. 109 (47) (2005) 10795–10797.

[7] **N. Agmon,** Mechanism of hydroxide mobility, Chem. Phys. Lett. 319 (3–4) (2000) 247–252.

[8] **E. Hammam, E.P.F. Lee, J.M. Dyke,** *Ab initio* molecular orbital calculations on NO^+ $(H_2O)_n$ cluster ions, Part I: Minimum-energy structures and possible routes to nitrous acid formation, J. Phys. Chem. A. 104 (19) (2000) 4571–4580.

[9] **A.M. Kuznetsov,** Adsorbtsiya parov vody na metallicheskikh poverkhnostyakh [The adsorption of water vapor on metal surfaces], Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal. 6 (5) (2000) 45–51.

[10] **K.-H. Sun, A. Silverman,** Lewis acid-base theory applied to glass, J. Am. Cer. Soc. 28 (1) (1945) 1–32.

[11] **M. Barbaro, A. Bonfiglio, L. Raffo,** A charge-modulated FET for detection of biomolecular processes: conception, modeling, and simulation, IEEE Transactions on Electron Devices. 53 (1) (2006) 158–166.

Received 12.01.2018, accepted 17.04.2018.

THE AUTHORS

DYUBO Dmitry B.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
doobinator@rambler.ru

TSYBIN Oleg Yu.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
otsybin@rphf.spbstu.ru

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018