

УДК 538.975

ДИАГНОСТИКА ПЛАНАРНОГО p – n -ПЕРЕХОДА

Л.А. Борыняк, Ю.Г. Пейсахович, Н.Ю. Петров, А.А. Штыгашев

Новосибирский государственный технический университет

В статье авторы кратко рассматривают способ измерения температуры в планарном pn -переходе методом сравнения степени нагретости двух тел. Для этого предлагается сопоставлять термодформации квазидвумерного p – n -перехода на подложке без теплоотвода с термодформациями контрольного слоя. Термодформации регистрируются голографической интерферометрией.

Ключевые слова: интерферометрия, термодформации, несимметричный двумерный p – n -переход, планарный p – n -переход.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-4-7-13

Введение

Двумерные светоизлучательные и светоприемные устройства в последнее время привлекают огромное внимание из-за размерно-зависимых электронных свойств. Основой для настоящей работы послужил патент [1]. В патенте предлагается изготовить светодиод на основе квазидвумерных p – n -переходов в пленках высоколегированного кремния. Полученные результаты в перспективе могут быть использованы при создании светоизлучающих и светоприемных устройств нового типа, например: быстродействующие инжекционные излучатели света и фотоприемники (оптронные пары), системы оптической связи на основе двумерных p – n -переходов, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии с последующей ионной имплантацией.

В объемном кремнии дно зоны проводимости и потолок валентной зоны находятся в разных точках зоны Бриллюэна, поэтому припороговые излучательно-поглощательные переходы электронов не могут быть вертикальными, они происходят с участием фононов и сравнительно маловероятны [2]. Однако, как показали расчеты Ossichini [3], в трехслойных структурах $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2$ с наноразмерной толщиной пленки кремния его квазидвумерная зонная структура существенным образом перестраивается: зоны проводимости и валентная значительно сужаются, возникают подзоны размерного квантования, квазидвумерные эффективные массы электронов и дырок сильно изменяются, запрещенная зона, напротив, становится шире, порог поглощения света смещается к более высокой частоте (происходит голубой сдвиг) и пороговые оптические переходы электронов приобретают высоковероятный вертикальный характер. Это открывает возможность использования прямых рекомбинационно-излучательных процессов на p – n -переходе в кремнии.

Излучательная рекомбинация – единственный физический механизм генерации света в p – n -переходе, который обеспечивается протеканием прямого тока через этот переход. Однако, когда ток проходит через p – n -переход, не вся энергия выделяется в виде излучаемого света, часть этой энергии переходит в тепло, в результате чего повышается температура прибора. С ростом температуры мощность излучения уменьшается и срок службы прибора сокращается. Поэтому возникает задача диагностики распределения температуры и оптимизации работы

p - n -перехода по его тепловому режиму, в противном случае возникают проблемы со стабильностью характеристик светодиода. В рамках решения этой проблемы прежде всего необходимо разработать надежную методику контроля температуры вдоль p - n -перехода.

2. Модель планарного pn -перехода

Квазидвумерная полупроводниковая пленка, расположена в плоскости $z = 0$, легирована в отрицательной полуплоскости $x < 0$ донорами, а в положительной полуплоскости $x > 0$ – акцепторами. Вблизи $x = 0$, после выравнивания химических потенциалов электронов F_n и дырок F_p , образуется область, обедненная поверхностными носителями заряда, с контактной разностью потенциалов $\Delta V = \varphi(-\infty) - \varphi(\infty)$.

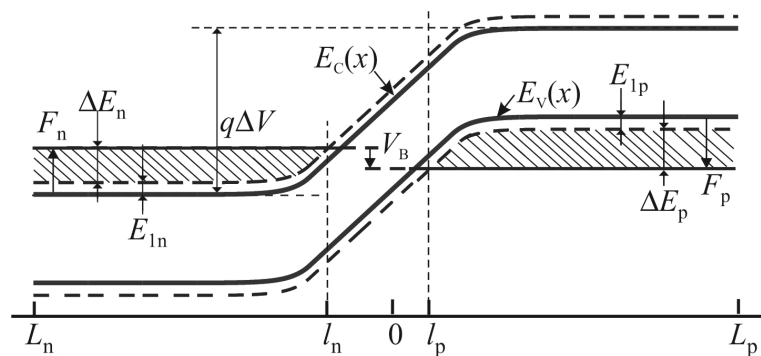


Рис. 1 – Координатно-энергетическая диаграмма двумерного p - n -перехода

Fig. 1. The coordinate-energy diagram of the two-dimensional p - n -junction

В работах [4–6] разработан и апробирован основанный на решении интегрального уравнения численный алгоритм расчета распределения потенциала и поверхностной плотности заряда в плоскости полупроводниковой пленки для модельного двумерного p - n -перехода в равновесии. Область применимости разрабатываемого подхода значительно шире области применимости алгоритма расчета распределения поверхностного потенциала и плотности заряда, основанного на решении двумерного уравнения Лапласа методом приближенного конформного отображения [7–8]. Найденные в численном расчете величины полуширины области обеднения и длины экранировки носителями заряда количественно согласуются с оценками по формулам работы [7] только при сравнительно небольших значениях эффективных масс и уровней легирования, с увеличением этих параметров наблюдается расхождение результатов.

Метод расчета потенциала и плотности заряда пленки, основанный на составлении и решении одномерного интегрального уравнения, может быть обобщен для задач с разными профилями легирования пленки, степенью вырожденности электронно-дырочного газа, асимметрией системы, наличием тока через переход и потенциала смещения. При расчете были заданы следующие значения модельных параметров симметричного двумерного p - n -перехода: толщина пленки $d = 5$ нм, концентрация легирующих примесей $N_S = 5,0 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$, эффективная масса $m^* = 0,1m_0$, m_0 – масса свободного электрона, ширина запрещенной зоны

$E_g = 1,12$ эВ, диэлектрическая проницаемость окружающей среды $\epsilon = 11,8$. Им соответствуют значения расчетных параметров: уровни размерного квантования $E_{1n} = E_{1p} = 0,151$ эВ, потенциал смещения $V_k = 1,45$ В, длина области обеднения $l = 28,9a_B = 1,81 \cdot 10^{-7}$ м. Были проведены аналогичные расчеты с другими значениями эффективной массы m^* и поверхностной концентрации N_S , в том числе для несимметричного p - n -перехода [6].

3. Электрофизические характеристики p - n -перехода

В коллективном центре НГТУ «Материаловедение и нанотехнологии» с привлечением материальной базы ИФП СО РАН был изготовлен латеральный p - n -переход кремний-на-изоляторе. В качестве диэлектрика используется фторид кальция, имеющий кристаллическую решетку, сходную с кремниевой и ширину запрещенной зоны 12 эВ. Эти структуры получают методом молекулярно-лучевой эпитаксии в замкнутом технологическом цикле. Основное направление исследований – это рост структур $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2$ на подложках Si(111), где легированные слои Si имеют толщину от 2 до 5 нм, а слои CaF_2 – порядка 200 нм. Данная структура привлекательна тем, что она может функционировать в условиях высоких температур (250...1000 °С) и высоких уровней радиационных воздействий. Предполагается, что она может обеспечить рекомбинационное излучение при нарушении динамического равновесия, когда через диод пропускают ток. Как указано в первом разделе, для оптимизации и работы p - n -перехода необходимо контролировать его температуру.

Применительно к полупроводникам наиболее точным является метод измерения температуры с помощью термочувствительных параметров. Для измерения и контроля температуры p - n -перехода наиболее широкое распространение получило прямое измерение вольт-амперной характеристики, т. е. падения напряжения при заданном токе как термочувствительного параметра. Это напряжение при постоянном токе через p - n -переход линейно зависит от температуры в широком интервале ее изменения. Принцип измерения температуры посредством контроля ВАХ p - n -перехода широко используется при прямых токах в диапазоне температур от 2 до 200 °С. Нагрев p - n -перехода сопровождается выделением тепла на его активном сопротивлении, что приводит к термодформации квазидвумерного образца, которые можно фиксировать методами голографической интерферометрии, что и было осуществлено в настоящей работе.

4. Способ измерения температуры в p - n -переходе

В основу метода положено сравнение степени нагретости двух тел, для чего предлагается сопоставлять термодформации контрольного слоя. В [9] рассмотрен голографический способ контроля термодформаций объектов микроэлектроники. Этот метод положен в основу измерения температуры p - n -перехода. Для решения задачи регистрации термодформаций используется накладной интерферометр, в котором голограммы регистрируются во встречных пучках по схеме Ю.Н. Денисюка. Контрольным объектом служил прогиб слоя SiO_2 , под которым методом фотолитографии формирован тензорезистор. Он изолирован от пьедестала также пленкой SiO_2 [10]. Тепловыделяющий элемент в виде тензорезистора позволяет контролировать ток и количество энергии, выделяемой локально на контрольном объекте. Осуществляя контроль выпучивания слоя SiO_2 над тензорезистором, строят

зависимость прогиба от температуры. Это позволяет осуществить измерение температуры в планарном переходе. Выбирая на ВАХ параметры прямого тока и падения прямого напряжения, можно обеспечить рабочие характеристики p - n -перехода.

5. Тепловые режимы p - n -переходов

Исследуемый в разделе 3 планарный p - n -переход посажен на подложку Si(111), обладающую малой теплопроводностью. На рис. 2 представлены характерные голографические изображения области p - n -переходов, обусловленные деформационным выпучиванием поверхности, связанным с нагревом и теплоотводом. Наличие и структура выпучивания поверхности зарегистрированы голографической интерферометрией.

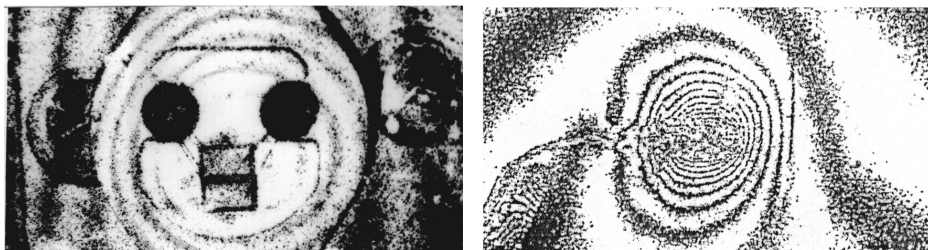


Рис. 2 – Теплоотвод обеспечен:

a – посадкой кристалла на медную пластину; *б* – посадкой кристалла на стеклянную подложку

Fig. 2 – The heat sink is provided by:

a – setting a crystal on a copper plate; *b* – setting a crystal on a glass substrate

Мощность тепловыделения на рис. 2, *a* от термоисточника составляет 2 Вт, а на рис. 2, *б* – 0,5 Вт, т. е. процесс теплоотвода является актуальным фактором. Поэтому возникает проблема контроля температуры с привлечением ВАХ в качестве термочувствительного параметра. После определения рабочих характеристик при нарушении динамического равновесия, когда через переход пропускают ток, необходимо точно контролировать прямое напряжение, с которым связан прямой ток, и в конечном счете электрофизические характеристики p - n -перехода.

Заключение

Исследование рабочих характеристик p - n -перехода методом диагностики степени его нагретости при включении прямого тока дают возможности обеспечения работоспособности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2300855 Российская Федерация. Инжекционное светоизлучающее устройство / А.А. Величко, В.А. Илюшин, Ю.Г. Пейсахович, А.А. Штыгашев. – Заявл. 07.07.2005; опубл. 10.06.2007, Бюл. № 16.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990. – 688 с.
3. Ossicini S., Fasolino A., Bernardini F. Gap opening in Si ultra-thin layers: role of confined and interface // Physical Review Letters. – 1994. – Vol. 72. – P. 1044–1047.

4. Расчет потенциала и плотности экранирующего заряда в равновесном симметричном двумерном pn -переходе / Ю.Г. Пейсахович, А.А. Штыгашев, Л.А. Боряняк, Н.Ю. Петров // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4. – С. 97–104.
5. Несимметричный двухмерный p - n -переход в равновесии / Ю.Г. Пейсахович, А.А. Штыгашев, Л.А. Боряняк, Н.Ю. Петров // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014): труды 12 международной конференции, Новосибирск, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 2. – С. 69–72.
6. Электрическое поле и плотность заряда в плоскости квазиравновесного несимметричного двумерного p - n -перехода без тока / Ю.Г. Пейсахович, А.А. Штыгашев, Л.А. Боряняк, Н.Ю. Петров // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, вып. 10. – С. 80–86.
7. Двумерный p - n -переход в равновесии / А.Ш. Ачоян, А.Э. Есаян, Э.М. Казарян, С.Г. Петросян // ФТП. – 2002. – Т. 36, вып. 8. – С. 969–973.
8. Петросян С.Г., Шик А.Я. Контактные явления в электронных системах пониженной размерности // ЖЭТФ. – 1989. – Т. 96, № 6. – С. 2229–2239.
9. Голографический метод исследования термодформаций объектов микроэлектроники / Л.А. Боряняк, Ю.Г. Пейсахович, Ю.К. Непочатов, Н.Ю. Петров // Автометрия. – 2011. – Т. 47, № 6. – С. 72–81.
10. Патент 2389973, Российская Федерация. Способ изготовления тензорезисторов для измерения деформации плоской поверхности элементов твердотельной электроники / Л.А. Боряняк, Ю.К. Непочатов. – Заявл. 30.07.2008; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.

DIAGNOSTICS OF A PLANAR p - n -JUNCTION

Borynyak L.A., Peisakhovich Yu.G., Petrov N.Yu., Shtygashev A.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In the article the authors briefly review the method of temperature measurement in a planar p - n -junction by comparing the degree of heating of two bodies. It is proposed to compare thermal deformations of a quasi-two-dimensional p - n -junction on a substrate without a heat sink with thermal deformations of the control layer. Thermal deformations are recorded by holographic interferometry.

Keywords: interferometry, thermal deformations, planar p - n -junction, asymmetric two-dimensional p - n -junction.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-4-7-13

REFERENCES

1. Velichko A.A., Ilyushin V.A., Peisakhovich Yu.G., Shtygashev A.A. *Inzheksionnoye svet-oizluchayushchee ustroystvo* [Injection-emitting device]. Patent RF, no. 2300855, 2007.
2. Bonch-Bruевич V.L., Kalashnikov S.G. *Fizika poluprovodnikov* [The physics of semiconductors]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 688 p.
3. Ossicini S., Fasolino A., Bernardini F. Gap opening in Si ultra-thin layers: role of confined and interface. *Physical Review Letters*, 1994, vol. 72, pp. 1044–1047.
4. Peisakhovich Yu.G., Borynyak L.A., Petrov N.Yu., Shtygashev A.A. Raschet potentsiala i plotnosti ekraniruyushchego zaryada v ravnovesnom simmetrichnom dvumernom p - n -perekhode [Calculation of potential and screening charge density in the equilibrium symmetric two-dimensional pn -junction]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 4, pp. 97–104.
5. Peisakhovich Yu.G., Borynyak L.A., Petrov N.Yu., Shtygashev A.A. [Asymmetric two-dimensional p - n -junction in equilibrium]. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya (APEP-2014)* [Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2014)], Novosibirsk, 2–4 October 2014, vol. 2, pp. 69–72. (In Russian).

6. Peisakhovich Yu.G., Borynyak L.A., Petrov N.Yu., Shtygashev A.A. Electric field and charge density in the plane of a quasi-equilibrium asymmetric 2d p - n -junction with zero current. *Technical Physics. Russian Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 60, no. 10, pp. 1494–1500. Translated from *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2015, vol. 85, iss. 10, pp. 80–86.
7. Achoyan A.Sh., Yesayan A.E., Ghazaryan E.M., Petrosyan S.G. Dvumernyj p - n -perehod v ravновесii [A two-dimensional p - n -junction under the equilibrium]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors*, 2002, vol. 36, iss. 8, pp. 969–973. (In Russian).
8. Petrosyan S.G., Shik A.Ya. Contact phenomena in low-dimensional electron systems. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1989, vol. 69, no. 6, p. 1261. Translated from *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 1989, vol. 96, no. 6, pp. 2229–2239.
9. Borynyak L.A., Nepochatov Yu.K., Peisakhovich Yu.G., Petrov N.Yu. Holographic study of thermal strains of microelectronic components. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 584–592. Translated from *Avtometriya*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 72–81.
10. Borynyak L.A., Nepochatov Yu.K. *Sposob izgotovleniya tenzorezistorov dlya izmereniya deformatsii ploskoi poverkhnosti elementov tverdotel'noi elektroniki* [A method of manufacturing tensorresistive for measuring strain of flat surface elements of solid-state electronics]. Patent RF, no. 2389973, 2010.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Боряняк Леонид Александрович – родился в 1945 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры общей физики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: оптические методы измерения. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: borynyak@corp.nstu.ru).

Borynyak Leonid Aleksandrovich (b. 1945) – Doctor of Sciences (Phys.&Math.), professor, professor at the general physics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests: are focused on optical measurement methods. He has published more than 80 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: borynyak@corp.nstu.ru).



Пейсахович Юрий Григорьевич – родился в 1947 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры общей физики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов в квантово-размерных системах. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: peisakhovich@corp.nstu.ru).

Peisakhovich Yuri Grigorievich (b. 1947) – Doctor of Sciences (Phys.&Math.), professor, professor at the general physics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests: are focused on mathematical modeling of physical processes in quantum-confined systems. He has published more than 80 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: peisakhovich@corp.nstu.ru).



Петров Никита Юрьевич – родился в 1987 году, старший преподаватель кафедры общей физики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов в квантово-размерных системах. Опубликовано 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: n.petrov@corp.nstu.ru).

Petrov Nikita Yuryevich (b. 17.10.1987) – senior lecturer at the department of general physics, Novosibirsk State Technical University. His

research interests include mathematical modeling of physical processes in quantum-confined systems. He has published 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: n.petrov@corp.nstu.ru).



Штыгашев Александр Анатольевич – родился в 1956 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры общей физики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов в квантово-размерных системах. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: shtygashev@corp.nstu.ru).

Shtygashev Alexander Anatolyevich (b. 11.09.1956) – Doctor of Sciences (Phys.&Math.), professor, professor at the general physics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests: are focused on mathematical modeling of physical processes in quantum-confined systems. He has published more than 50 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: shtygashev@corp.nstu.ru).

Статья поступила 15 декабря 2017 г.

Received December 15, 2017

To Reference:

Borynyak L.A., Peisakhovich Yu.G., Petrov N.Yu., Shtygashev A.A. Diagnostika planarnogo p - n -perekhoda [Diagnostics of a planar p - n -junction]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 4 (37), pp. 7–13. doi: 10.17212/1727-2769-2017-4-7-13