

Особенности рекомбинационных потерь фототока в анизотипных гетеропереходах $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$

© М.Н. Солован[¶], В.В. Брус, П.Д. Марьянчук

Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
58012 Черновцы, Украина

(Получена 27 марта 2014 г. Принята к печати 22 апреля 2014 г.)

Получены фоточувствительные гетероструктуры $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ методом реактивного магнетронного распыления. Гетероструктуры генерируют напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.4\text{ В}$ и ток короткого замыкания $I_{sc} = 1.36\text{ мА/см}^2$ при освещении 80 мВт/см^2 . Из анализа освещенной ВАХ и спектра квантовой эффективности установлено, что низкие фотоэлектрические параметры обусловлены рекомбинацией в базовой области гетероперехода и формированием высокоомного слоя SiO_2 на поверхности поликристаллического кремния, который не обеспечивает качественной пассивации поверхностных состояний.

Введение

Нитрид титана (TiN) — один из самых перспективных нитридов переходных металлов. Тонкие пленки TiN нашли широкое практическое применение благодаря удачной совокупности физико-химических параметров: большая ширина запрещенной зоны, низкое удельное сопротивление, достаточно высокий коэффициент пропускания в видимой части спектра, высокая твердость, высокая износостойкость, хорошая химическая инертность и устойчивость к коррозии [1–3].

Благодаря своим физическим свойствам TiN и Si являются перспективными материалами для применения в различных фотоэлектрических приборах [4,5].

В нашей предыдущей работе [6] были исследованы анизотипные гетеропереходы $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ путем нанесения тонкопленочного TiN на полированные подложки кремния методом реактивного магнетронного распыления. В исследуемых гетеропереходах наблюдалась s -форма ВАХ при освещении (зависимость эффективности разделения фотогенерированных носителей заряда от внешнего смещения). Известно, что при длительном хранении кремния на его поверхности образуется собственный оксид SiO_x толщиной 5–6 нм [4]. Слой собственного оксида на поверхности базового полупроводника и соответственно условия пассивации поверхностных состояний, могут существенно влиять на электрические и фотоэлектрические свойства гетеропереходов [4,5].

Цель данной работы состоит в исследовании причины низких фотоэлектрических параметров анизотипных гетероструктур $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$.

Нанесение пленок TiN проводилось на полированные подложки поликристаллического Si (типоразмером $5 \times 5 \times 1\text{ мм}$) методом реактивного магнетронного распыления мишени чистого титана в атмосфере смеси аргона и азота.

Более подробно технология создания гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ описана в работе [6].

Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики гетероструктур $n\text{-TiN}/p\text{-CdTe}$ измеряли с помощью комплекса SOLARTRON SI 1286, SI 1255.

Спектральное распределение внешней квантовой эффективности исследуемой гетероструктуры измерялось с помощью спектрофотометра МДР-20 в диапазоне длин волн 295–900 нм. Спектральное распределение интенсивности излучения кварцевой галогеновой лампы в указанном диапазоне определялось с помощью калиброванного кремниевое фото диода.

На рис. 1 представлены темновая и световая вольт-амперные характеристики гетероструктуры $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$.

Как видно из рис. 1, при освещении белым светом интенсивностью 80 мВт/см^2 обратный ток I_{light} возрастает по сравнению с его величиной в темноте I_{dark} . Гетероструктура имеет максимальное напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.4\text{ В}$ и ток короткого замыкания $I_{sc} = 1.36\text{ мА/см}^2$. Стоит отметить зависимость величины фототока ($I_{light} - I_{dark}$) от приложенного напряжения (см. вставку на рис. 1), что обусловлено повышением эффективности разделения фотогенерированных носителей заряда за счет расширения области пространственного заряда при увеличении обратного смещения. Такая зави-

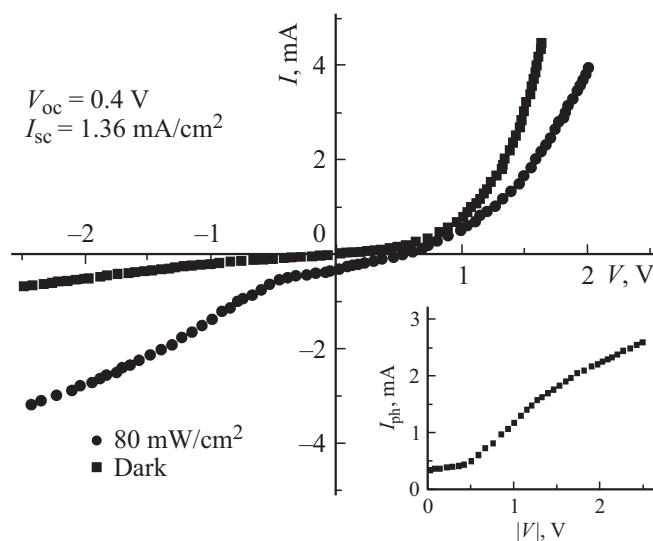


Рис. 1. Темновая и световая ВАХ гетероперехода $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ в полулогарифмическом масштабе. На вставке приведена зависимость величины фототока от приложенного напряжения.

[¶] E-mail: solovan-86@mail.ru

симось фототока от приложенного напряжения характерна для доминирования поверхностной рекомбинации на гетерогранице, а также рекомбинации в базовой области гетероперехода [7]. Однако необходимы дополнительные исследования для однозначного определения доминирующих рекомбинационных потерь фотогенерированных носителей заряда в гетеропереходах *n-TiN/p-Si*.

Величину последовательного сопротивления гетероструктуры R_s можно определить из наклона прямой ветви вольт-амперной характеристики. Видно, что в области напряжений больше высоты потенциального барьера кривые $I = f(V)$ переходят с экспоненциальной зависимости в линейную. Это свидетельствует о том, что напряжение на барьерной области гетероперехода перестает изменяться, т.е. барьер практически открыт, а ток через гетеропереход ограничивается его последовательным сопротивлением R_s . Определенное значение R_s составляет 70 Ом.

Исследованы вольт-фарадные свойства гетероперехода *n-TiN/p-Si* при трех частотах измерительного сигнала: 10, 20 и 30 кГц (рис. 2). Вольт-фарадные характеристики исследуемой гетероструктуры представлены в виде прямолинейных зависимостей в системе координат $C^{-2} = f(V)$, что свидетельствует о равномерном распределении легирующей примеси в базовом материале. Параллельное смещение вольт-фарадных характеристик при увеличении частоты возбуждающего сигнала обусловлено влиянием относительно большого последовательного сопротивления гетероструктуры, определенно-го выше [8–10].

На вставке рис. 2 изображена зависимость напряжения отсечки V_c от квадрата циклической частоты ω^2 с целью определения величины встроенного потенциала $V_{bi} = 0.2$ В исследуемого гетероперехода, учитывая влияние его последовательного сопротивления [8]. Несовпа-

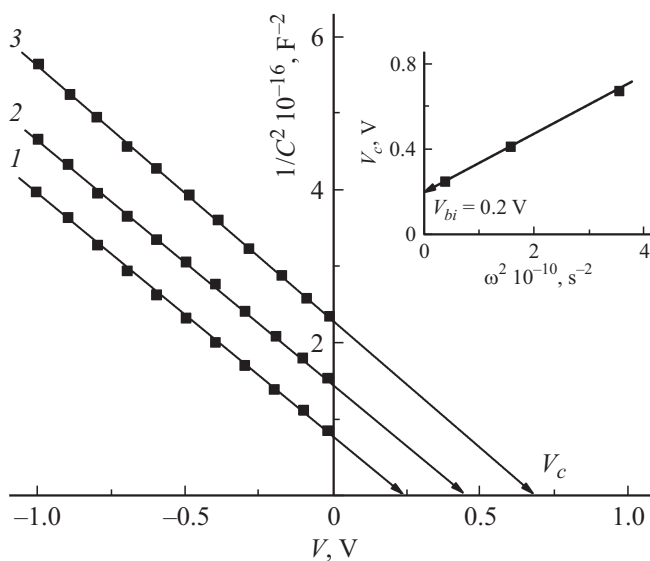


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика гетероперехода *n-TiN/p-Si* при разных частотах измерительного сигнала: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30 кГц при 295 К.

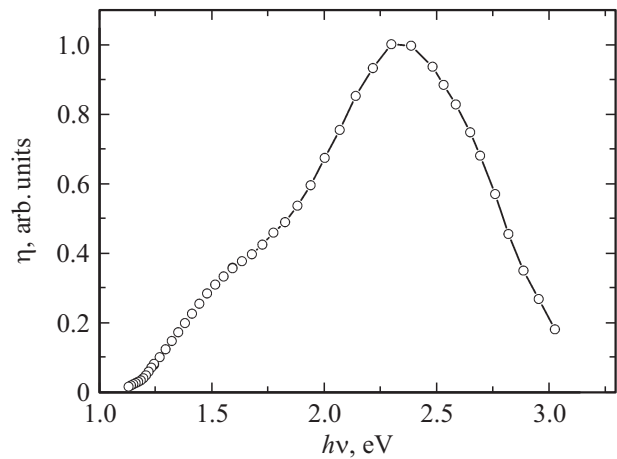


Рис. 3. Спектральное распределение внешнего квантового выхода гетероперехода.

дение значений встроенного потенциала, определенных с вольт-амперной [6] и вольт-фарадной характеристик, обусловлено влиянием поверхностных электрически активных состояний, поскольку влияние последовательного сопротивления уже учтено. Поверхностные состояния, которые играют роль центров захвата или рекомбинации в зависимости от их энергетического положения в запрещенной зоне, существенно влияют не только на барьерные параметры исследуемых гетеропереходов, но и на их фотоэлектрические свойства [7,10].

Спектральное распределение внешнего квантового выхода $\eta(\lambda)$ определяется как отношение количества носителей заряда, формирующих ток короткого замыкания, к числу падающих фотонов при освещении изучаемых гетеропереходов *n-TiN/p-Si* со стороны пленки TiN (рис. 3). Отсутствие резкого коротковолнового края в спектрах квантовой эффективности гетеропереходов *n-TiN/p-Si* связано с малой толщиной пленки TiN и ее поликристаллической структурой, а также влиянием рекомбинационных процессов с участием поверхностных состояний [2,7]. Низкие значения квантовой эффективности в длинноволновой области обусловлены рекомбинацией в базовой области, а следовательно, относительно малыми значениями времени жизни неосновных носителей заряда в поликристаллическом кремнии [11,12].

Из анализа ВАХ освещенного гетероперехода и его спектра квантовой эффективности установлено, что низкие фотоэлектрические параметры обусловлены рекомбинацией фотогенерированных носителей заряда в базовой области гетероперехода при участии электрически активных поверхностных состояний на гетерогранице TiN/Si.

В заключение стоит отметить, что модификация поверхности поликристаллической кремниевой подложки, а также внедрение дополнительных промежуточных слоев позволит уменьшить концентрацию поверхностных состояний на границе раздела TiN/Si и тем самым повысить эффективность фотоэлектрического преобразования [13,14].

Список литературы

- [1] G. Gagnon, J.F. Currie, C. Beique, J.L. Brebner, S.G. Gujrathi, L. Onllet. *J. Appl. Phys.*, **75**, 1565 (1994).
- [2] М.Н. Солован, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук, Т.Т. Ковалюк, J. Rappich, M. Gluba. *ФТП*, **55**, 2123 (2013).
- [3] М.Н. Солован, В.В. Брус, Э.В. Майструк, П.Д. Марьянчук. *Неорг. матер.*, **50**, 46 (2014).
- [4] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: теория и эксперимент* (М., Энергоатомиздат, 1987) [Пер. с англ.: A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube. *Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion* (N.Y., 1983)].
- [5] К. Чопра, С. Дас. *Тонкопленочные солнечные элементы* (М., Мир, 1986) [Пер. с англ. с сокр.: K.L. Chopra, S.R. Das. *Thin film solar cells* (Plenum Press, N.Y., 1981)].
- [6] М.Н. Солован, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук. *ФТП*, **27**, 1185 (2013).
- [7] V.V. Brus. *Sol. Energy*, **86**, 786 (2012).
- [8] Ю.А. Гольдберг, О.В. Иванова, Т.В. Львов, Б.В. Царенков. *ФТП*, **17**, 1472 (1984).
- [9] A.S. Kavasoglu, N. Kavasoglu, S. Oktik. *Sol. St. Electron.*, **52**, 990 (2008).
- [10] V.V. Brus. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 035 024 (2012).
- [11] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979) [Пер. с англ.: V.L. Sharma, R.K. Purohit. *Semiconductor heterojunctions* (Pergamon Press, 1974)].
- [12] V.V. Brus, M.I. Pashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk, K.S. Ulyanytsky. *Semicond. Sci. Technol.*, **26**, 125 006 (2011).
- [13] В.В. Брус, М.И. Илащук, В.В. Хомяк, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К.С. Ульяницкий. *ФТП*, **46**, 1175 (2012).
- [14] V.V. Brus, M.I. Pashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 055 008 (2012).

Редактор Т.А. Полянская