

УДК 621.315.592

С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, В.Г. Мишустин, К.О. Аношкин**ТОКОПЕРЕНОС ЧЕРЕЗ БАРЬЕР НА КОНТАКТЕ
МЕТАЛЛ – НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ПОЛУПРОВОДНИК:
ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ВАХ**

Предложен способ расчета прямых и обратных вольт-амперных характеристик контакта металл – некристаллический полупроводник, основанный на классической диффузионной теории для кристаллических полупроводников с учетом особенностей электронного строения и электрофизических свойств неупорядоченных полупроводниковых материалов. Получено аналитическое выражение для расчета обратной вольт-амперной характеристики с учетом понижения эффективной высоты барьера за счет туннелирования носителей заряда через тонкий барьерный слой. Предложен способ описания токопередачи через структуру металл – некристаллический полупроводник – металл как системы встречно включенных барьеров.

Введение. Анализ вольт-амперных характеристик (ВАХ) позволяет получить информацию об электрофизических свойствах контактирующих материалов. По форме ВАХ можно сделать вывод об идеальности контакта, преобладающих механизмах токопередачи, а исследование температурной зависимости ВАХ позволяет рассчитать энергию активации проводимости и положение уровня Ферми. Таким образом, анализ ВАХ является одним из наиболее доступных и информативных методов исследования [1].

Обычно при анализе экспериментальных ВАХ барьерных структур на основе неупорядоченных полупроводников используется традиционный математический аппарат, разработанный для кристаллов, с учетом поправочных коэффициентов, которые получают эмпирическим путем. Целью данной работы является получение аналитической зависимости для ВАХ контакта металл – неупорядоченный полупроводник, которая учитывает особенности электрофизических свойств этих материалов.

Детали расчета. Отличие электронной структуры неупорядоченных полупроводников от кристаллических обуславливает отличия ВАХ барьеров на контакте металл – полупроводник для соответствующих материалов. Из-за высокой плотности состояний (ПС), локализованных в щели подвижности, распределение контактного поля в области пространственного заряда (ОПЗ) неупорядоченного полупроводника значительно отличается от классического барьера Шоттки для кристаллов [2].

Применение экспоненциальной аппроксимации распределения ПС в щели подвижности позволяет теоретически рассчитать зависимость хода внутреннего электрического поля $F(x)$ и

электростатического потенциала $\varphi(x)$ в ОПЗ контакта металл – неупорядоченный полупроводник [2]:

$$F(x) = \sqrt{\frac{2g_{F0}}{\beta^2 \epsilon \epsilon_0}} \operatorname{tg}\left(\frac{W-x}{\sqrt{2}L_D}\right); \quad (1)$$

$$\varphi(x) = -\frac{2}{\beta e} \ln \left| \cos\left(\frac{W-x}{\sqrt{2}L_D}\right) \right|. \quad (2)$$

Здесь g_{F0} – величина ПС вблизи уровня Ферми, β – параметр аппроксимации распределения ПС. Ширина ОПЗ W и дэбаевская длина экранирования L_D определяются следующими формулами [3]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon \epsilon_0}{e^2 g_{F0}}} \arccos \left[\exp\left(-\frac{\beta e(\varphi_0 - U)}{2}\right) \right]; \quad (3)$$

$$L_D = \sqrt{\frac{e^2 g_{F0}}{\epsilon \epsilon_0}}. \quad (4)$$

В формуле (3) φ_0 – высота потенциального барьера на контакте металл – полупроводник со стороны полупроводника, U – внешнее смещение.

В отличие от кристаллического полупроводника распределение поля в ОПЗ нелинейное, оно концентрируется вблизи контакта. Это приводит к тому, что барьер "сужается", а его эффективная высота понижается за счет переноса носителей сквозь тонкий туннельно-прозрачный слой. Аналогичные процессы происходят и в кристаллическом полупроводнике, однако они не оказывают заметного влияния на форму ВАХ.

Прямая ветвь ВАХ описывается так же, как и в кристалле, экспоненциальным законом. Основное отличие барьеров на кристалле и неупорядоченном полупроводнике видно при анализе обратной ветви ВАХ. Из-за понижения эффек-

тивной высоты барьера при обратном включении ток увеличивается по экспоненциальному закону, и при определенном значении напряжения переход открывается (рисунок 1). Аналитически обратная ветвь ВАХ описывается следующей формулой:

$$j(U) = q \cdot \mu_n \cdot F_{\max}(U) \cdot n_0 \times \exp\left(-\frac{\varphi_B - \Delta\varphi_B(U)}{\varphi_T}\right) \left[\exp\left(\frac{U}{\varphi_T}\right) - 1 \right]. \quad (5)$$

Здесь $F_{\max}(U)$ – максимальная напряженность контактного поля на границе металл – полупроводник, n_0 – концентрация электронов проводимости в полупроводнике, φ_B – высота потенциального барьера со стороны металла, $\Delta\varphi_B(U)$ – понижение эффективной высоты барьера за счет туннелирования носителей. Значения $F_{\max}(U)$ и $\Delta\varphi_B(U)$ рассчитываются по (1) и (2), где вместо x подставляется ширина туннельно-прозрачного слоя. На рисунке 1 изображено семейство расчетных ВАХ контакта металл – неупорядоченный полупроводник. Для сравнения на рисунке 2 приведены экспериментальные ВАХ для структуры Mo/a-Si:H/Mo при различных температурах.

Похожий подход предлагается в работе [4]. Однако в [4] в расчетной формуле используется параметр χ , который не имеет однозначной физической интерпретации.

Предлагаемый способ расчета позволяет получить ВАХ, опираясь на классическую диффузионную теорию выпрямления на контакте металл – полупроводник, и одновременно учесть особенности электрофизических свойств неупорядоченных полупроводниковых материалов. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными в работе [5], где измеренные ВАХ моделировались с помощью эквивалентной схемы контакта a-SiGe:H/c-Si.

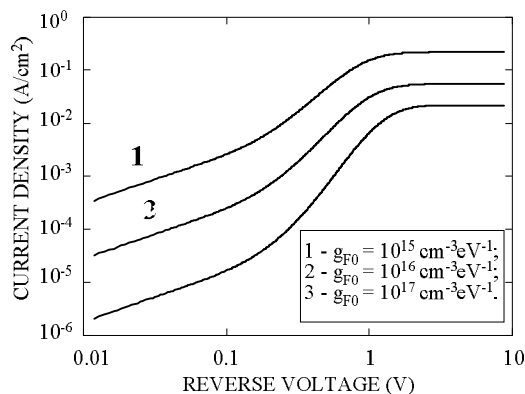


Рисунок 1 – Расчетные ВАХ структуры Al/a-Si:H/Al при различных значениях ПС

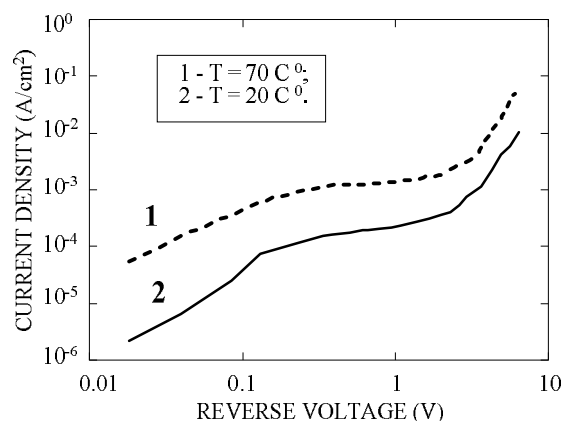


Рисунок 2 – Экспериментальные ВАХ структуры Mo/a-Si:H/Mo при различных температурах

Результаты и их обсуждение. Анализ экспериментальных данных [4 – 6] показывает, что прямая и обратная ВАХ контакта металл – неупорядоченный полупроводник отличаются по абсолютным значениям, но качественно имеют одинаковую зависимость (рисунок 3). Это противоречит классическим представлениям о контактных явлениях в твердых телах.

Объяснить это отклонение можно следующим образом. Обычно рассматривают один барьер, возникающий на контакте, второй же контакт считают омическим. Ввиду особенностей электрофизических свойств неупорядоченных полупроводников получить омический контакт к ним практически очень сложно, скорее речь следует вести о квазиомическом контакте [7]. Используя такой подход, контакт металл – неупорядоченный полупроводник следует рассматривать как систему встречно включенных барьеров. Это позволяет объяснить особенности ВАХ таких контактов, т.е. ток через структуру металл – полупроводник – металл по своей природе является обратным, а разница по абсолютной величине при прямом и обратном включении объясняется различием свойств контактов.

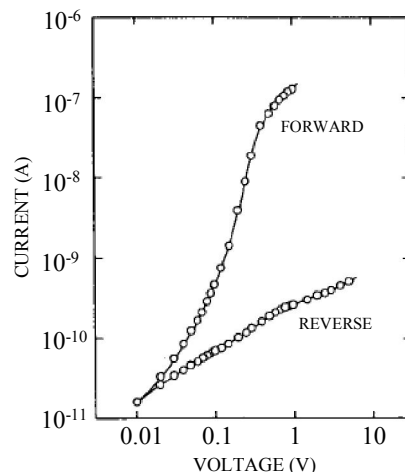


Рисунок 3 – Прямая и обратная ВАХ структуры Al/a-Si:H ($g_{F0} = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ V}^{-1}$) [6]

То же самое можно применить и к сэндвич-структуре, где в качестве верхнего и нижнего электродов используется один и тот же металл [6]. В этом случае асимметрия ВАХ объясняется тем, что плотность состояний в пленке полупроводника изменяется в процессе напыления: в начале процесса ПС высокая, по мере роста пленки величина ПС снижается. Это приводит к различным свойствам контактов (рисунок 1).

Заключение. Таким образом, аналитическая зависимость тока от обратного напряжения (5), полученная для контакта металл - некристаллический полупроводник, позволяет учесть особенности электрофизических свойств неупорядоченных полупроводниковых материалов. Анализ ВАХ может быть использован как экспресс-метод контроля параметров техпроцесса, поскольку форма ВАХ зависит от величины и распределения ПС в полупроводнике.

Работа выполняется при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию.

Библиографический список

1. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. Физические процессы в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников: Учеб. пособие. Рязань, 2005. 72 с.
2. С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, В.Г. Мишустин, А.П. Авачев, И.Г. Уточкин, А.А. Попов ФТП, 39, 1189 (2005).
3. Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Уточкин И.Г. Расчет профиля потенциального барьера на границе металл - неупорядоченный полупроводник // Вестник РГРТА. Вып. 10. Рязань, РГРТА. 2002. С. 74 – 78.
4. В.В. Ильченко, В.И. Стриха ФТП, 18, 873 (1984).
5. Мазуров А.В. Электрофизические и оптоэлектронные свойства гетероструктур на основе a-Si:H и его сплавов: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Москва, 2004.
6. H. Matsuura Electrical properties of amorphous-crystalline semiconductor heterojunctions and determination of gap-state distribution in amorphous semiconductors: Dissertation. Kyoto University, 1994.
7. С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, В.Г. Мишустин, А.А. Маслов, А.А. Попов Способ создания омических контактов в тонкопленочных устройствах на аморфных гидрогенизированных полупроводниках / Патент РФ № 2229755 (2004).