

Влияние магнитного поля на электрофизические свойства поверхностно-барьерных структур Bi–Si–Al

© Б.В. Павлык[¶], А.С. Грыпа, Д.П. Слободзян, Р.М. Лыс, И.А. Шикоряк, Р.И. Дидык

Львовский национальный университет им. Ивана Франко,
79000 Львов, Украина

(Получена 30 ноября 2009 г. Принята к печати 1 ноября 2010 г.)

Обнаружены вызванные действием магнитного поля эффекты перестройки структурных дефектов на границе раздела полупроводник–металл. Анализ вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик свидетельствует о магнитостимулированном увеличении положительного заряда в диэлектрической прослойке, а также указывает на изменение плотности поверхностных состояний в зависимости от степени легирования исследуемых полупроводников.

1. Введение

Одной из актуальных задач современной электроники является создание надежных и прогнозируемых систем, которые могли бы работать в экстремальных условиях — в широком диапазоне температур, под воздействием радиации, атмосферы, магнитного поля и т.п. Влияние внешних факторов стимулирует изменения электрофизических и оптических характеристик кристаллов, в том числе кремния (Si), а также приборов, изготовленных на их основе.

В последние годы появилось значительное число публикаций, посвященных изучению закономерностей изменения параметров и характеристик кремниевых поверхностно-барьерных и диодных структур под действием магнитных и радиационных полей [1–4]. При этом основной акцент делается на анализе их структурно-чувствительных характеристик, которые определяются параметрами дефектов, их подвижностью, взаимодействием и формированием более стабильных дефектов. Такие исследования позволяют получить более полную информацию о процессах перестройки структурных дефектов и дают возможность прогнозировать и управлять изменениями определенных параметров приборов современной электроники.

Данные по влиянию магнитных полей на поверхностно-барьерные структуры (ПБС), полученные в конкретных технологических условиях, в литературе очень малочисленны. В работах [5,6] приведены экспериментальные результаты исследования способа формирования структур металл–окисел–полупроводник и действие на них радиации. Показано, что особое место в процессах, происходящих в скрытом слое окисла кремния, принадлежит водороду.

Цель данной работы — исследование магнитостимулированных процессов перестройки структурных дефектов в поверхностном слое структуры Bi–Si–Al.

2. Методика эксперимента

Для исследований были использованы монокристаллические образцы *p*-Si с двумя различными концен-

трациями легирующей примеси: удельное сопротивление составляло 24 Ом·см (производства НПО „Карат“, г. Львов) и 10 Ом·см (производства „Рост“, г. Киев).

Поочередное формирование омических (Al) и барьерных (Bi) контактов и их термические обработки при 650–700 и 300–400 К соответственно проводили в вакуумной камере (остаточное давление $p \approx 10^{-5}$ Па) без разгерметизации до полного завершения цикла. Барьерные структуры имели высокую временную стабильность характеристик благодаря разработанной специальной технологии их формирования.

Вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики поверхностно-барьерных структур ПБС-1 и ПБС-2, полученных на кремнии с удельным сопротивлением 24 и 10 Ом·см соответственно, исследовали с помощью емкостного спектрометра УРАН-1, и они оставались практически неизменными на контрольных образцах в течение всех исследований.

Магнитная обработка образцов проводилась в постоянном однородном магнитном поле с индукцией $B = 0.17$ Тл.

3. Экспериментальные результаты и их анализ

На рис. 1 и 2 показаны магнитостимулированные ($B = 0.17$ Тл) изменения вольт-амперных характеристик $I(V)$ структур ПБС-1 (кривые 1, 1', 1'') и ПБС-2 (кривые 2, 2', 2''). Как видно, максимальные изменения наблюдаются для прямой и обратной ветвей ВАХ ПБС-1. Прямая ветвь ВАХ ПБС-2 практически не изменилась под действием магнитного поля (время экспозиции 288 ч). Выдержка ПБС-1 в течение 96 ч в магнитном поле привела к уменьшению крутизны ВАХ, а за последующие 192 ч выдержки ВАХ практически не изменилась. Наиболее наглядно действие магнитного поля проявляется в изменениях обратных ветвей ВАХ ПБС-1 и ПБС-2. Увеличение времени экспозиции в магнитном поле приводит к увеличению обратного тока ПБС-1.

В теоретических моделях барьерных структур считается, что основной вклад в вид ВАХ вносят поверхностные электронные состояния на границе раздела

[¶] E-mail: pavlyk@electronics.wups.lviv.ua

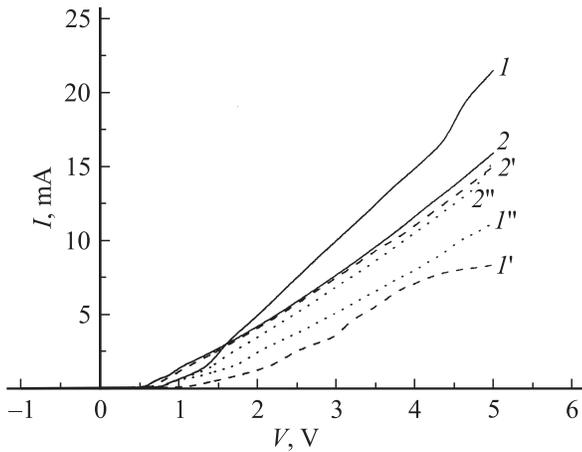


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ ПБС-1 (I, I', I'') и ПБС-2 ($2, 2', 2''$). $I, 2$ — исходные образцы; $I', 2'$ — через 96 ч выдержки в магнитном поле; $I'', 2''$ — через 288 ч выдержки в магнитном поле.

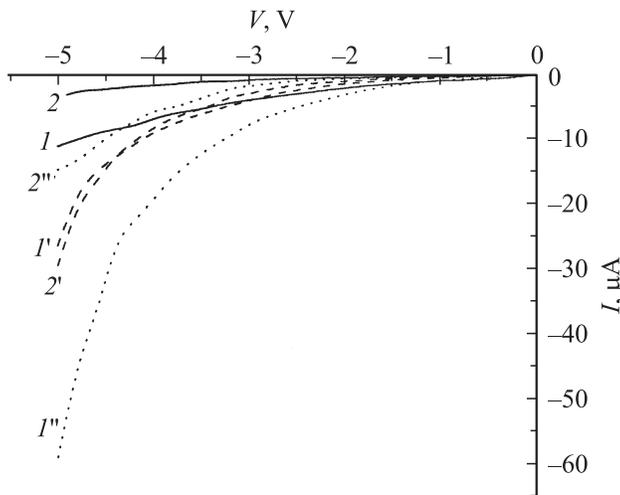


Рис. 2. Обратные ветви ВАХ ПБС-1 (I, I', I'') и ПБС-2 ($2, 2', 2''$). $I, 2$ — исходные образцы; $I', 2'$ — через 96 ч выдержки в магнитном поле; $I'', 2''$ — через 288 ч выдержки в магнитном поле.

полупроводник–металл. При воздействии на ПБС магнитного поля происходит частичная перестройка метастабильных приповерхностных дефектов, в состав которых входят SiO_2 , Si-OH [1]. В результате перестройки центров меняется их заряд, а также заряд на поверхностных энергетических состояниях и, как следствие, увеличивается концентрация носителей заряда.

В исходных ПБС, при достаточно широкой области пространственного заряда (ОПЗ), туннелирование носителей заряда через барьер является несущественным — электроны с энергией меньше высоты барьера будут отражаться от него. Действие магнитного поля стимулирует перестройку структурных дефектов, вследствие чего увеличивается вероятность туннелирования. Если электроны, которые туннелировали, были захвачены

на структурные дефекты, расположенные в глубине ОПЗ, то они при обратном напряжении на барьерной структуре могут давать существенное увеличение числа носителей заряда.

На рис. 3 представлены вольт-фарадные характеристики $C(V)$ на частоте модуляций 125 кГц для структур ПБС-1 и ПБС-2 (кривые $I, 2$) и их изменения при выдержке в магнитном поле в течение 96 (кривые $I', 2'$) и 288 ч (кривые $I'', 2''$).

Методика исследования высокочастотных ВФХ позволяет получить обширную информацию об электронных состояниях на межфазных границах. Авторы работы [2] считают, что максимум на ВФХ отвечает за процессы перезарядки низкоэнергетического уровня быстрых поверхностных состояний, плотность которых $\sim 2.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$.

Вольт-фарадные характеристики ПБС-1 и ПБС-2 имеют некоторые особенности. Из анализа ВФХ ПБС-2 (кривые $2, 2', 2''$) видно, что амплитуда характерного максимума в области прямых смещений возрастает (на $\sim 60\%$) под действием магнитного поля (время экспозиции 96 ч), при этом угол наклона кривых $C(V)$ не изменяется. Увеличение продолжительности воздействия магнитного поля на структуру до 288 ч приводит к незначительному смещению максимума в сторону более высоких напряжений и уменьшению его амплитудного значения, при этом изменяется угол наклона линейного участка $C(V)$ -характеристики, что обусловлено увеличением плотности поверхностных состояний.

Несмотря на то что технологии формирования ПБС-1 и ПБС-2 были однотипными, выходные $C(V)$ -характеристики и их изменения под действием магнитного поля различны, но имеют общие черты:

- имеются две области модуляции емкости от максимального значения до минимального;
- модуляция емкости при положительных смещениях в обеих структурах связана с формированием обла-

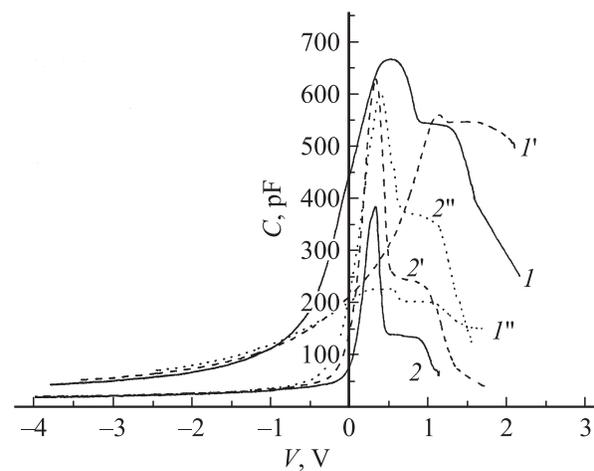


Рис. 3. Влияние магнитного поля ($B = 0.17 \text{ Тл}$) на ВФХ ПБС-1 (I, I', I'') и ПБС-2 ($2, 2', 2''$). $I, 2$ — исходные образцы; $I', 2'$ — через 96 ч выдержки в магнитном поле; $I'', 2''$ — через 288 ч выдержки в магнитном поле.

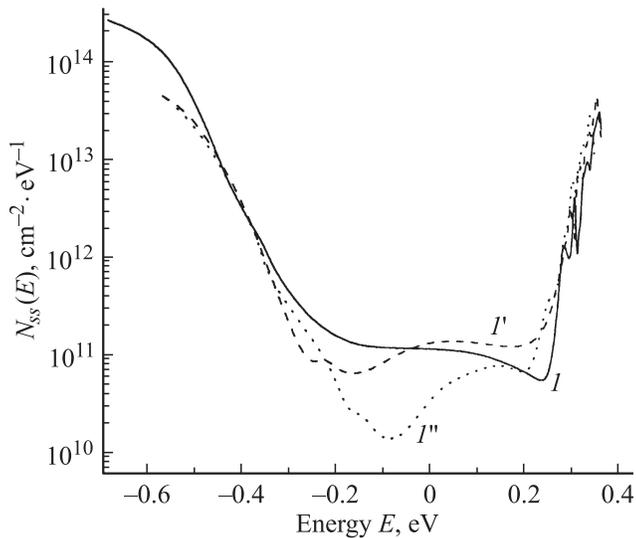


Рис. 4. Распределение плотности поверхностных состояний в запрещенной зоне кремния на границе раздела полупроводник–диэлектрик для ПБС-1 без магнитного поля (I), а также после выдержки в магнитном поле в течение 96 (I') и 288 ч (I'').

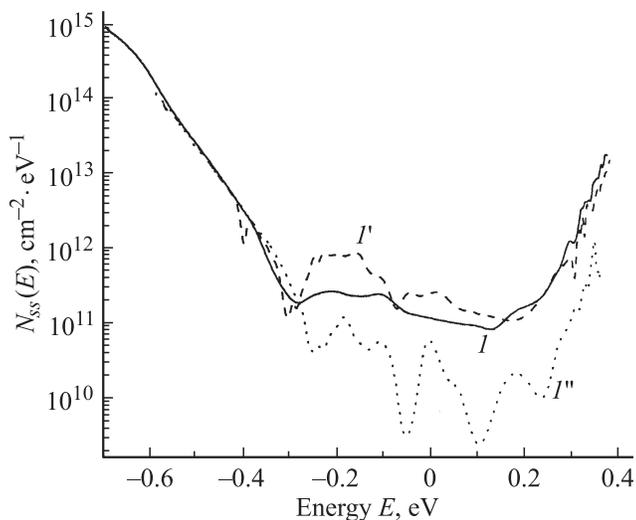


Рис. 5. Распределение плотности поверхностных состояний в запрещенной зоне кремния на границе раздела полупроводник–диэлектрик для ПБС-2 без магнитного поля (I), а также после выдержки в магнитном поле в течение 96 (I') и 288 ч (I'').

сти пространственного заряда в диэлектрическом слое барьерного контакта;

— максимальная емкость структуры определяется емкостью диэлектрического слоя; минимальная емкость (значения емкости на ступеньке) задается концентрацией носителей в приповерхностном слое Si.

Смещение области модуляции емкости по оси напряжений (кривые I, I', I'') позволяет предположить, что магнитное поле стимулирует эффективность перестроич-

ных процессов дефектной структуры на границе раздела полупроводник–окисел и, как следствие, происходит накопление положительного заряда в диэлектрическом слое. Угол наклона кривых в области модуляции емкости, который задается плотностью поверхностных состояний, свидетельствует об их существенном изменении под действием магнитного поля. Анализ зависимости $C^2 = f(V)$ в области обратных смещений позволяет оценить концентрацию примеси в кристалле кремния. В нашем случае концентрация акцепторной примеси лежит в пределах $(2.78-5.45) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ для ПБС-1 и $(7.15-8.30) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ для ПБС-2.

Из анализа ВФХ наших структур и по величине напряжения плоских зон можно рассчитать величину заряда, локализованного в диэлектрическом слое. Величина накопленного заряда в ПБС-2 составляет: $1.45 \cdot 10^{-10}$ Кл без магнитного поля, $4.66 \cdot 10^{-10}$ Кл после 96 ч выдержки в магнитном поле, $2.66 \cdot 10^{-10}$ Кл после 288 ч выдержки в магнитном поле.

Эти данные хорошо коррелируют с магнитостимулированными изменениями ВФХ структур, показанными на рис. 3 (кривые 2, 2', 2'').

Анализ $C(V)$ -характеристик позволяет рассчитать плотность поверхностных состояний $N_{ss}(E)$ с учетом того, что адсорбция Vi на поверхности $\text{Si}(111)$ существенно уменьшает плотность поверхностных состояний, обусловленных ненасыщенными орбиталями поверхностных атомов, а также ненапряженностью связей между атомами первых двух координационных сфер Si [7]. На рис. 4 и 5 показаны распределения плотности поверхностных состояний в запрещенной зоне кремния для ПБС-1 и ПБС-2 до и после воздействия на них магнитного поля. В ПБС-1 на начальной стадии действия магнитного поля (96 ч) плотность поверхностных состояний возрастает примерно в 3 раза по сравнению с первоначальным значением, а в ПБС-2 почти не изменяется. При увеличении продолжительности воздействия (до 288 ч) плотность поверхностных состояний в структуре ПБС-2 уменьшилась примерно на порядок, а в случае структуры ПБС-1 уменьшилась в полтора раза относительно исходного значения.

Таким образом, можно утверждать, что основным эффектом от действия магнитного поля на ПБС является возникновение положительного заряда на границе раздела полупроводник–диэлектрический слой. В ПБС-2 после 288 ч действия магнитного поля наблюдается уменьшение плотности поверхностных состояний примерно на порядок: от $1.6 \cdot 10^{11}$ до $2.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$ (рис. 5, кривые I, I''). В ПБС-1 проявляется стимулируемый магнитным полем рост обратного тока, изменение плотности поверхностных состояний (рис. 4) и, как следствие, резкое уменьшение величины встроенного заряда и емкости в приповерхностном слое кремния.

4. Заключение

Таким образом, технологические особенности синтеза кристаллов кремния приводят к появлению некото-

рых различий в закономерностях изменений параметров ПБС под действием магнитного поля. На границе раздела полупроводник–металл образуется часть структурных дефектов в метастабильном состоянии. Под действием внешних магнитных и электрических полей происходит их перестройка. Возможно, это обусловлено вхождением водорода или гидроксидов в структуру окисного слоя. Водород взаимодействует со связями OH-SiO_2 , образуя $\text{SiO}_3\text{-H}$, а также дефекты могут диссоциировать в магнитном поле и образовывать E' -центры (SiO_3) и межузельные атомы водорода. Последние за счет высокой подвижности диффундируют с образованием H_2 , в результате чего вероятность рекомбинации становится очень низкой.

Необходимо отметить и тот факт, что наблюдаемая разница в поведении ВФХ под действием магнитного поля двух ПБС на кремнии с разным удельным сопротивлением (10 и 24 Ом·см) также обусловлена технологическими особенностями синтеза кристаллов Si на двух фирмах-производителях, степени их совершенства и концентрацией примеси.

Список литературы

- [1] В.А. Макара, М.А. Васильев, Л.П. Стебленко, О.В. Коплак, А.Н. Курилюк, Ю.Л. Кобзарь, С.Н. Науменко. ФТП, **42** (9), 1061 (2008).
- [2] Ш. Махкамов, Н.А. Турсунов, М. Ашуров, Р.П. Сандов, С.В. Мартынченко. ЖТФ, **69** (1), 121 (1999).
- [3] А.А. Скворцов, А.М. Орлов, А.А. Соловьев, Д.И. Белов. ФТТ, **51** (12), 2304 (2009).
- [4] Д.В. Николаев, И.В. Антонова, О.В. Наумова, В.П. Попов, С.А. Смагулова. ФТП, **37** (4), 443 (2003).
- [5] R.E. Stahlbush, G.J. Campisi, J.B. McKitterick, W. Maszara, P. Roitman. IEEE Trans. Nucl. Sci., **39**, 2086 (1992).
- [6] M. Bruel. Electron. Lett., **31**, 1201 (1995).
- [7] П.В. Мельник, М.Г. Находкин, М.И. Федорченко. УФЖ, **44** (9), 1142 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of magnetic field on the electrical properties of surface-barrier structures Bi–Si–Al

B.V. Pavlyk, A.S. Hrypa, D.P. Slobodzyan, R.M. Lys, J.A. Shykoryak, R.I. Didyk

Ivan Franko National University of L'viv,
79000 L'viv, Ukraine

Abstract The effects of reconstruction of the structural defects at the interface semiconductor–metal, caused by the action of magnetic field have been detected. The analysis of current–voltage and capacitance–voltage characteristics shows a stimulated by magnetic field increase of positive charge in the dielectric layer, as well as change of surface states density, depending on doping degree of the semiconductors under consideration.