

- [1] Palmetshofer L. — Appl. Phys. A, 1984, v. 34, N 3, p. 139—153.
 [2] Heinrich H. — Lect. Not. Phys., 1980, v. 133, p. 407—426.
 [3] Вейс А. Н. — ДАН СССР, 1986, т. 289, в. 6, с. 1355—1359.
 [4] Вейс А. Н., Прокофьева Л. В. — ФТП, 1987, т. 21, в. 4, с. 743—746.
 [5] Бытенский Л. И., Кайданов В. И., Мельник Р. Б., Немов С. А., Равич Ю. И. — ФТП, 1980, т. 14, в. 1, с. 74—79.
 [6] Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS. М., 1968. 383 с.
 [7] Вейс А. Н., Кайданов В. И., Крупицкая Р. Ю., Мельник Р. Б., Немов С. А. — ФТП, 1980, т. 14, в. 12, с. 2349—2356.
 [8] Волков Б. А., Панкратов О. А. — ЖЭТФ, 1985, т. 88, в. 1, с. 280—293.
 [9] Беспалова Н. С., Вейс А. Н., Дашевский З. М. — ФТП, 1987, т. 21, в. 5, с. 946—948.

Ленинградский политехнический институт
им. М. И. Калинина

Получено 1.03.1988
Принято к печати 22.03.1988

ФТП, том 22, вып. 8, 1988

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ВОЛН В КРЕМНИИ

Гостев А. В., Корнилов Б. В., Привезенцев В. В.,
Рау Э. И., Щетинин А. Г.

Известно, что при возбуждении неустойчивости электронно-дырочной плазмы типа рекомбинационных волн (РВ) [1] образец становится электрически неоднородным: вблизи одного из контактов наблюдается существенное изменение потенциала, составляющее значительную долю от всего падения потенциала на образце. При возбуждении быстрых РВ в германии с примесью марганца [2] такая область локализуется вблизи анода [3, 4], а при возбуждении медленных РВ в кремнии, компенсированном цинком в процессе вытягивания из расплава, — вблизи катода [5]. Одним из теоретических выводов работы [4] является заключение о том, что при возбуждении медленных РВ в полупроводнике *n*-типа область существенного изменения потенциала должна располагаться у анода. В настоящей работе методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) визуализированы области существенного изменения потенциала при возбуждении медленных РВ в кремнии, компенсированном цинком в процессе диффузионного отжига. Изучены местоположение, зарождение и развитие этой области, эффекты в которой находят свое отражение в особенностях вольтамперной характеристики (ВАХ) образца.

Исследовались образцы *n*-типа с концентрацией цинка $N_{Zn} = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Компенсация исходного кремния была проведена так, что выполнялось необходимое условие для генерации медленных РВ $p_0/n_0 > \tau_p/\tau_n$ [1], где $n_0 = 1.2 \cdot 10^{11}$, $p_0 = 5.1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, $\tau_n = 9.2 \text{ мс}$, $\tau_p = 4.3 \text{ мкс}$ — соответственно концентрации и времена жизни электронов и дырок. Расстояние между планарными алюминиевыми контактами составляло 2.5 мм.

Исследования проводились в режиме потенциального контраста в РЭМ JSM-35CF. В экспериментах использовалась коаксиально-симметричная конструкция коллектора-анализатора вторичных электронов с анализирующим тормозящим электрическим и удерживающим магнитным полями, обладающая высокой эффективностью их сбора [6]. Конструкция обеспечивала линейность передаточной характеристики в диапазоне напряжений $\pm 10 \text{ В}$. С целью уменьшения полевых эффектов на образце, которые наиболее заметны в области сильного электрического поля, вытягивающее поле коллектора было повышено до 750 В/мм. Электрическая схема включения образца обеспечивала режим

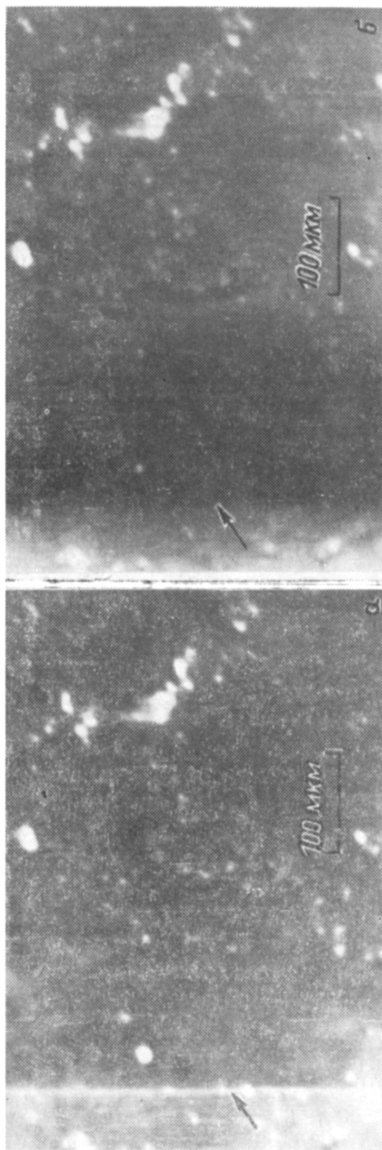


Рис. 1. Формирование области значительного изменения потенциала.

a — смещение на образце $V=0$, вертикальная светлая полоса — часть электрода; *b* — смещение на образце $V=25$ В, катод слева, стрелка указывает границу электрода, вертикальная темная полоса — область значительного изменения потенциала. Масштаб 1 : 200. Линейный размер 100 мкм.

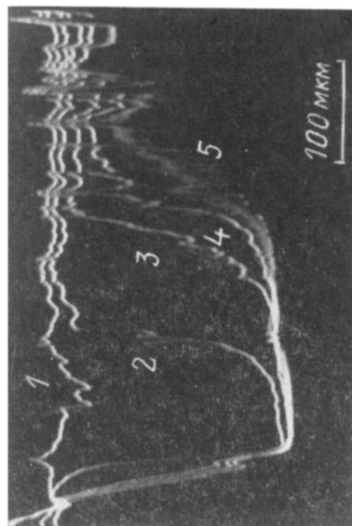


Рис. 2. Осциллограммы распределения потенциала при формировании области значительного изменения потенциала.

Катод слева, стрелка указывает границу электрода, смещение на образце В: 1 — 0, 2 — 25, 3 — 45, 4 — 55, 5 — 65; размытие последней осциллограммы вызвано генерацией колебаний тока. Масштаб 1 : 200. Линейный размер 100 мкм.

короткого замыкания по току и позволяла одновременно с наблюдением неустойчивости тока в РЭМ контролировать форму осцилляций тока с помощью запоминающего осциллографа. Степень влияния электронного зонда на амплитуду осцилляций тока была крайне незначительна (при включенном и выключенном зонах амплитуда изменялась не более чем на 5 %). При ускоряющем напряжении РЭМ 25 кВ и токе зонда 10^{-10} А число инжектированных в образец электронов составляло в экспериментах 10^{17} см⁻².

На рис. 1 показаны микрофотографии области значительного изменения потенциала на поверхности образца. Из них видно, что эта область располагается у катода. Ее протяженность увеличивается с ростом напряжения на образце. При перемене полярности прикладываемого к образцу напряжения области значительного изменения потенциала у этого же контакта не возникает, а образуется она у противоположного. Иначе говоря, она является индуцированной.

С микрофотографиями коррелируют профили зависимости потенциала от координаты поверхности, снятые при сканировании вдоль образца по строке (рис. 2). Плато на этих кривых вызвано ограничением в измерительном тракте при напряжениях более 25 В. Видно, что протяженность области значительного изменения потенциала растет с увеличением напряжения на образце в диапазоне 2 ÷ 70 В, причем по линейному закону — до величины примерно 300 мкм. При перемене полярности поле у этого же контакта становится однородным. Полученные экспериментальные результаты о местоположении области значительного изменения потенциала, локализующейся у катода, находятся в противоречии с теоретическими выводами работы [4], согласно которой эта область в нашем случае должна располагаться вблизи анода.

Образование и развитие области значительного изменения потенциала находят свое отражение в особенностях ВАХ образца. Имеет место замедление роста тока от напряжения, когда омический участок на ВАХ при $V > 2В$ переходит в сублинейный с зависимостью тока от напряжения вида $I \propto V^{1/2}$ в том же диапазоне напряжений, где наблюдается эта область. При напряжениях на образце $V > 70$ В сублинейный участок на ВАХ переходит в суперлинейный с зависимостью тока от напряжения вида $I \propto V^2$, а в цепи в этот момент генерируются синусоидальные автоколебания тока, вызванные возбуждением медленных рекомбинационных волн.

Образование области значительного изменения потенциала у катода, по-видимому, может быть обусловлено эксклюзией основных носителей заряда у обратно смещенного контакта, поскольку в компенсированных полупроводниках величина обеднения основными носителями заряда [7] $\Delta n = \Delta p (\tau_n / \tau_p)$ может достигать заметной величины из-за того, что отношение $\tau_n / \tau_p \approx 10^2 \div 10^3$. В нашем случае для кремния *n*-типа с примесью цинка это отношение составляет $\tau_n / \tau_p = 2 \cdot 10^3$. Рост области значительного изменения потенциала с увеличением приложенного к образцу напряжения простирается примерно до 300 мкм, когда на ВАХ образца наблюдается переход от линейной к квадратичной зависимости тока от напряжения, вызванной, по-видимому, сильной инжекцией с прямо смещенного контакта.

В заключение приведем результаты и выводы настоящей работы: 1) проведена визуализация области значительного изменения потенциала в кремнии *n*-типа с примесью цинка при возбуждении медленных РВ; 2) эта область локализуется у катода, что противоречит теоретическим результатам работы [4]; 3) область значительного изменения потенциала является индуцированной; 4) ее протяженность растет по линейному закону с увеличением напряжения на образце и она занимает (максимально) около 12 % от всего образца; 5) образование и развитие области значительного изменения потенциала сопровождаются наличием сублинейного участка ВАХ образца в диапазоне напряжений 2 ÷ 70 В.

Л и т е р а т у р а

- [1] Константинов О. В., Перель В. И. — ФТТ, 1964, т. 6, в. 11, с. 3364—3371.
- [2] Карпова И. В., Калашников С. Г. — Письма ЖЭТФ, 1967, т. 6, в. 10, с. 954—957.
- [3] Гвоздочер Р. С., Карпова И. В., Калашников С. Г., Лукьянов А. Е., Рау Э. И., Спивак Г. В. — Радпотехн. и электрон., 1970, т. 15, в. 11, с. 2368—2371.

- [4] Карпова И. В., Сабликов В. А., Сыроевигин С. М. — ФТП, 1982, т. 16, в. 11, с. 1963—1968.
 [5] Завадский Ю. И., Корнилов Б. В. — ФТТ, 1969, т. 11, в. 6, с. 1494—1504.
 [6] Гостев А. В., Рау Э. И., Спивак Г. В. — Изв. АН СССР, сер. физ., 1984, т. 48, в. 2, с. 299—302.
 [7] Смит Р. Полупроводники. М., 1982. 560 с.

Получено 8.06.1987
 Принято к печати 24.03.1988

ФТП, том 22, вып. 8, 1988

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СПЛАВОВ $A^{III}B^V-Ge$ (Si)

Леонов В. В.

Известно, что тип проводимости легированных монокристаллов полупроводников $A^{III}B^V$, Ge и Si определяется донорным или акцепторным влиянием примеси. Поэтому ожидалось сохранение подобной закономерности при легировании эвтектических сплавов $A^{III}B^V-Ge$ (Si) акцепторными примесями Zn, Ga, донорными Sb, Te и нейтральными Pb, Ni при их содержании $10^{15}-10^{20}$ см⁻³.

Оказалось, что тип проводимости эвтектических сплавов не изменяется в результате легирования, а именно сплавы InSb—Ge, GaSb—Ge имеют *p*-тип проводимости, InAs—Ge, GaAs—Ge, GaAs—Si — *n*-тип. Возникают следующие вопросы: почему тип проводимости эвтектического сплава не зависит от вида примеси и какими факторами он определяется?

Во-первых, отсутствие влияния примеси возможно из-за меньшей концентрации ее по сравнению с взаимной растворимостью компонентов эвтектики. Во-вторых, при введении примеси донорного характера (акцепторного) может увеличиваться взаимная растворимость компонентов эвтектики.

Тип проводимости фаз эвтектического сплава определяется видом и концентрацией имеющихся электрически заряженных дефектов. При избытке в одной из фаз электронов, а в другой — дырок будет наблюдаться процесс перетекания носителей заряда из одной фазы в другую, и тип проводимости при этом определяется типом носителей заряда, преобладающих в первой фазе. Если объем одной из фаз (матрицы) намного больше другой (включения), то тип проводимости сплава будет определяться типом проводимости матрицы.

Дефектами в германии (кремнии) являются акцепторы A'_{Ge} и доноры B'_{Ge} , а в соединении $A^{III}B^V$ — доноры Ge'_A или Si'_A и акцепторы Ge'_B или Si'_B из-за амфотерности германия и кремния.

Для прогнозирования типа проводимости эвтектических сплавов $A^{III}B^V-Ge$ (Si) необходимо определить фазу-матрицу и основной тип дефектов в ней. Если компоненты эвтектики имеют значительно различающиеся температуры плавления, то, как известно, матрицу будет образовывать компонент с более низкой температурой плавления. Прогнозировать преобладающий тип дефектов в матрице можно на основе данных о радиусах компонентов и их средства к электрону.

В работе [1] приведены температуры плавления соединений, °C: AlN > > 2400, AlAs > 1600, GaP — 1500, Si — 1420, GaAs — 1237, InP — 1062, AlSb — 1050, Ge — 958, InAs — 942, GaSb — 712, InSb — 525. Из двух компонентов (соединение или простое вещество) один, расположенный в данном ряду правее, будет, как правило, образовывать матрицу. Например, в эвтектическом сплаве Si—GaP матрица образована на основе кремния.

Значения электроотрицательности, по Паулингу и Хайсинскому [1], следующие: N — 3.0, P — 2.1, As — 2.0, B — 2.0, Sb — 1.8, Si — 1.8, Ge — 1.7, Ga — 1.6, In — 1.6, Al — 1.5. Замещение благоприятно между атомами с близкими значениями электроотрицательности. Германий в соединениях в порядке убывания образует дефекты Ge'_{Ga} , Ge'_{In} , Ge'_{Sb} , Ge'_{Al} , Ge'_B , Ge'_{As} , Ge'_P , Ge'_N ,