

05:06

Влияние дефектов на температурную зависимость концентрации электронов в двумерном и легированном каналах селективно-легированных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

© С.Г. Дмитриев, К.И. Спиридонов

Институт радиотехники и электроники РАН,
141120 Фрязино, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 2 февраля 1998 г.)

Представлены результаты расчета концентраций электронов в двумерном и легированном каналах селективно-легированных гетероструктур $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$. Показано, что ловушки и поверхностные состояния в слое AlGaAs могут изменить знак температурной зависимости концентрации электронов в двумерном канале.

Концентрации (и подвижности) электронов в двумерном n_s и легированном n (слой AlGaAs) каналах селективно-легированных гетероструктур (СЛГС) являются традиционными характеристиками их качества. Непосредственные измерения этих параметров в отдельном канале затруднены, и в литературе предлагаются методы косвенного характера [1] и расчеты. В настоящей работе будет показано, что наличие ловушек и поверхностных состояний в слое AlGaAs влияет на температурные зависимости концентраций электронов в каналах и может привести к изменению знака температурной зависимости n_s .

Легирующая примесь в слое AlGaAs (так называемые DX -центры [2]) при расчете рассматривалась в рамках модели U^- -центра (двухзарядный центр с отрицательной корреляционной энергией электронов) [3]; двумерный электронный газ — в рамках модели с двумя уровнями размерного квантования [1]; метод расчета описан в [4]. Параметры гетероструктур: толщины спейсера d и легированной области l в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ — 30 и 500 Å (либо 350 Å) соответственно, $x = 0.3$, концентрация легирующей примеси (кремний) $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ соответствовала технологическим структурам.

Температурная зависимость статической диэлектрической проницаемости [5,6] аппроксимировалась квадратичными сплайнами; разрыв зоны проводимости на границе гетероперехода $\Delta E_c = 0.60\Delta E_g$ [7], где ΔE_g — разность зависящих от температуры [6] ширины запрещенных зон $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и GaAs ; расстояние между минимумами Γ - и L -; X -долин (в eV) при температуре $T = 300 \text{ K}$ $\Delta E_{L\Gamma} = 0.284 - 0.605x$ и $\Delta E_{X\Gamma} = 0.476 - 1.122x + 0.143x^2$ [8]; эффективные массы плотности состояний соответственно для Γ -, L -, X -долин $m_\Gamma = 0.0665 + 0.0835x$, $m_L = 0.56 + 0.22x$, $m_X = 0.85 - 0.06x$ [6]; глубины залегания мелкого (нейтрального) $\varepsilon_0 = 10 \text{ meV}$ [3] и глубокого (заряженного отрицательно) $\varepsilon_1 = 120 \text{ meV}$ [9] уровней легирующей примеси (DX -центра); кратности вырождения $g^+ = 1$, $g^0 = 2$, $g^- = 4$ [4]. Приведенные значения параметров соответствуют экспериментальным данным указанных работ.

На рис. 1 приведены результаты расчета температурных зависимостей двумерных концентраций электронов в двумерном канале $n_s(T)$ (кривая 1), в Γ -долине (кривая 2) и в Γ -, L - и X -долинах (кривая 3) слоя AlGaAs , а также суммарная концентрация электронов в зоне проводимости AlGaAs и на мелком уровне легирующей примеси $n(T)$ для случая свободной (без металлизации) поверхности AlGaAs с эффективной фиксированной концентрацией заряда поверхностных состояний (ПС) $N_s = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (в единицах заряда электрона); при такой концентрации ПС высота барьера на внешней поверхности AlGaAs , отсчитанного от уровня Ферми, порядка 0.8 eV. Такой случай соответствует ситуации, когда обмен электронами между ПС (все состояния верхнего защитного слоя GaAs на поверхности AlGaAs) и зоной проводимости AlGaAs затруднен из-за наличия барьера и ПС "заморожены". Штриховая линия здесь (и на других

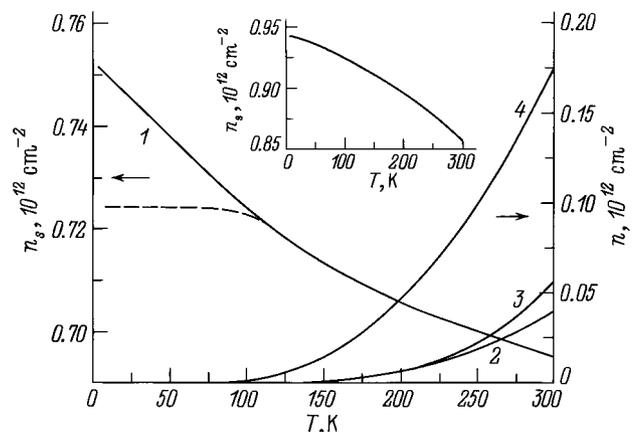


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации электронов в двумерном $n_s(T)$ и легированном $n(T)$ каналах СЛГС: $d = 30 \text{ Å}$, $x = 0.3$, $l = 500 \text{ Å}$, $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_s = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$; 1 — $n_s(T)$; 2, 3 — концентрации электронов в Γ и Γ , L и X долинах AlGaAs ; 4 — суммарная концентрация электронов в зоне проводимости и на мелком уровне легирующей примеси в слое AlGaAs ; штриховая линия — "заморозка" зарядов на глубоком уровне DX -центра при $T = 120 \text{ K}$. На вставке — $n_s(T)$ для случая обычной мелкой примеси.

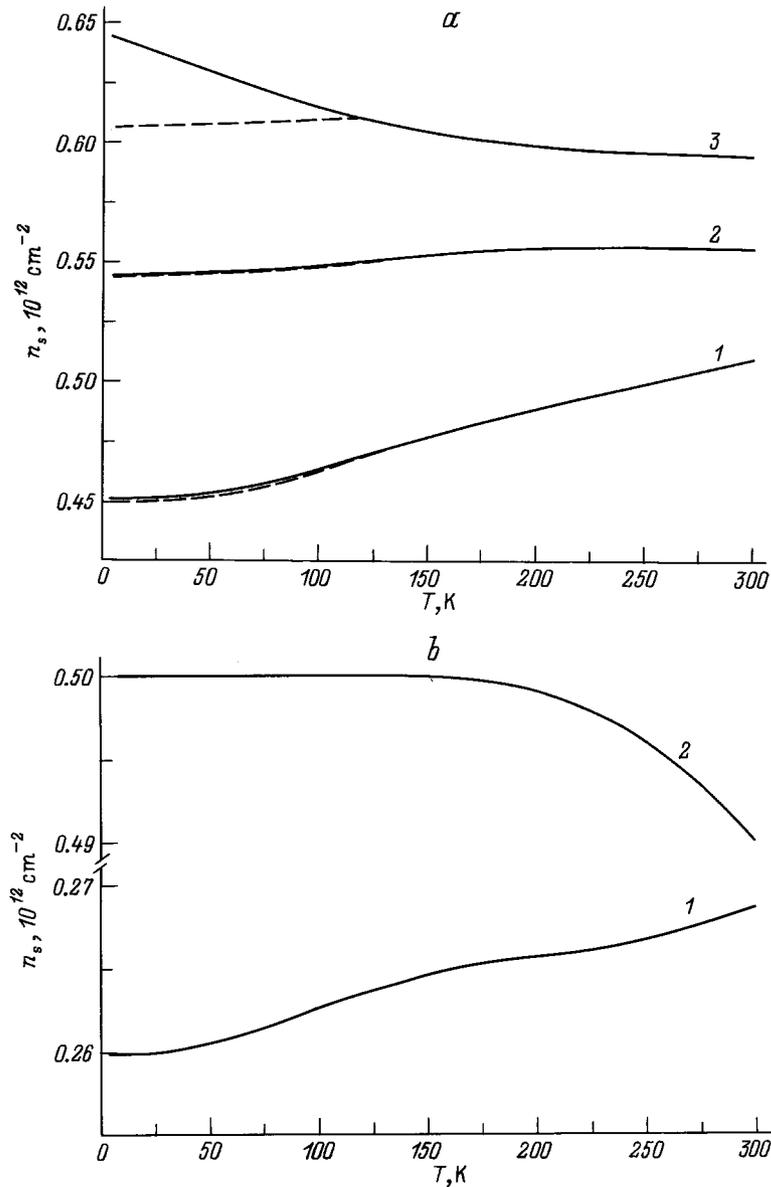


Рис. 2. Влияние ловушек и поверхностных состояний в слое AlGaAs на температурную зависимость $n_s(T)$ концентрации электронов в двумерном канале СЛГС: $d = 30 \text{ \AA}$, $x = 0.3$, $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\varepsilon_t = 200 \text{ meV}$; *a* — влияние ловушек на $n_s(T)$; $l = 500 \text{ \AA}$; 1 — $N_s = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_t = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 2 — $N_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_t = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 3 — $N_s = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_t = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; *b* — влияние ПС на $n_s(T)$; $l = 350 \text{ \AA}$, $N_t = 0$; 1 — фиксирован барьер $V = 1 \text{ eV}$ на внешней поверхности слоя AlGaAs; 2 — $N_s = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Штриховые линии — ”заморозка” зарядов на глубоком уровне DX-центра при $T = 120 \text{ K}$.

рисунках) описывает случай ”заморозки” при $T = 120 \text{ K}$ зарядов на глубоком уровне DX-центра [2,3,9]. На вставке для сравнения приведена зависимость $n_s(T)$ для случая обычной мелкой легирующей примеси.

Рисунок иллюстрирует устойчивость знака зависимости $n_s(T)$ по отношению к различным факторам: наличию у легирующей примеси глубокого уровня, заморозки зарядов на нем (из-за большого $\sim 300 \text{ meV}$ барьера для захвата электронов [2]) и др. Это связано с более сильной (при постоянной концентрации электронов в слое) температурной зависимостью уровня Ферми в слое AlGaAs, чем в двумерном канале. При этом электроны

переносятся как из зоны проводимости, так и с примесных уровней.

Ситуация меняется при появлении дополнительных каналов переноса — ловушки (концентрации N_t) и уровни ПС. Рис. 2, *a* иллюстрирует влияние ловушки ($\varepsilon_t = 200 \text{ meV}$) на зависимость $n_s(T)$ при ”замороженных” зарядах на ПС. В этих структурах ловушки нередко связаны с собственными дефектами (или дефектными комплексами) [6,10]. Как видно, знак $n_s(T)$ меняется, величина эффекта зависит от N_t и N_s (и других факторов).

Влияние ПС на зависимость $n_s(T)$ для более короткой структуры $l = 350 \text{ \AA}$, когда это влияние особенно

заметно, представлено на рис. 2, *b*. Высота барьера (от уровня Ферми) на внешней поверхности AlGaAs $V = 1\text{ eV}$ и фиксирована (что соответствует случаю контакта с металлом). Аналогичный эффект будет, очевидно, наблюдаться, если "включить" обмен зарядами с ПС. Здесь же для сравнения представлен график с "замороженными" ПС, $N_s = 3 \cdot 10^{12}\text{ cm}^{-2}$.

Заметим, что при реальных значениях концентрации легирующей примеси зона проводимости "сливается" с примесной зоной и происходит переход Мотта [6] (в рамках данной модели суммарная концентрация электронов в зоне проводимости и на мелком уровне представлена кривой 4 на рис. 1). При этом в связи с наличием порога подвижности электронов в зоне проводимости в слое AlGaAs может иметь активационный характер.

Наличие такого порога может наблюдаться в релаксационных процессах после накачки электронов в канал AlGaAs [11], а маскирующие эффекты, связанные с перезарядкой примесей в активном слое GaAs, обычно более медленны [12].

В заключение заметим, что температурная зависимость концентрации электронов в двумерном канале СЛГС относительно невелика — порядка нескольких процентов. Обычно концентрация растет с понижением температуры, однако наличие дефектов и поверхностных состояний в слое AlGaAs может привести к изменению знака этой температурной зависимости.

Список литературы

- [1] *Шур М.* // Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.
- [2] *Mooney P.M.* // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 67. N 3. P. R1–R26.
- [3] *Theis T.N.* et al. // J. Electron. Mater. 1991. Vol. 20. N 1. P. 35–48.
- [4] *Дмитриев С.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 11. С. 13–17.
- [5] *Samara G.A.* // Phys. Rev. B. 1983. Vol. 27. N 6. P. 3494–3505.
- [6] *Pavesi L., Guzzi M.* // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75. N 10. P. 4779–4842.
- [7] *Smith S.R.* et al. // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75. N 2. P. 1010–1013.
- [8] *Adachi S.* // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. N 3. P. R1–R29.
- [9] *Oelgart G.* et al. // Semicond. Sci. Technol. 1990. N 5. P. 894–899.
- [10] *Krispin P.* et al. // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 77. N 11. P. 5773–5781.
- [11] *Борисов В.И., Дмитриев С.Г., Любченко В.Е.* и др. // ФТП. 1994. Т. 28. Вып. 7. С. 1199–1204.
- [12] *Powell A.L.* et al. Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67. N 21. P. 3010–3013.