

Управление условиями возбуждения и параметрами автоколебаний тока в компенсированном кремнии, легированном марганцем

© М.К. Бахадырханов, Х. Азимхужаев, Н.Ф. Зикриллаев, А.Б. Сабдуллаев, Э. Арзикулов

Ташкентский государственный технический университет,
700095 Ташкент, Узбекистан

(Получена 25 мая 1999 г. Принята к печати 18 августа 1999 г.)

Исследованы образцы кремния, легированные бором в разной концентрации и компенсированные марганцем. Установлены условия возникновения и определены параметры автоколебаний тока.

Автоколебания тока обнаружены и исследованы во многих элементарных полупроводниках и полупроводниковых соединениях [1–8]. Анализ результатов этих работ показал, что в большинстве случаев отсутствовали закономерности зависимости изменения условий возбуждения и параметров автоколебаний тока от основных электрофизических параметров исследуемого материала. Также во всех упомянутых работах не обсуждалось влияние концентрации электрически активных примесных атомов на условия возбуждения и основные параметры автоколебаний. Это в свою очередь не только затрудняло выяснение механизма явления, но также не давало возможности использования автоколебаний тока для разработки и создания твердотельных генераторов с управляемыми параметрами и других приборов на их основе.

Цель данной работы — определение термодинамических условий возбуждения автоколебаний и закономерности изменения их параметров в зависимости от концентрации электрически активных компенсирующих примесных атомов. Одним из основных условий возбуждения автоколебаний тока в полупроводниках является наличие определенной концентрации глубоких центров с анизотропными сечениями захвата. Поэтому важно определить, в каких граничных концентрациях (N_{\max} и N_{\min}) и при каких состояниях глубоких примесей возбуждаются регулярные и стабильные автоколебания тока.

Нами в качестве исходного материала был использован промышленный монокристаллический кремний p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 220, 100, 10, 4.5, 2, 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, при этом концентрация атомов легирующей примеси бора изменялась в интервале $N_B = 1 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В качестве компенсирующей примеси был выбран марганец. Такой выбор обусловлен тем, что диффузионная технология получения кремния, легированного марганцем, хорошо отработана [9], что дает возможность получить материал с воспроизводимыми параметрами. Диффузия марганца производилась с таким расчетом, чтобы независимо от исходной концентрации бора в кремнии были получены компенсированный и перекомпенсированный кремний с удельным сопротивлением $\rho = 10^2 \div 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. В итоге для исследования были подобраны компенсированные образцы с одинаковыми геометрическими размерами, кристаллическим направлением [111] и удельным

сопротивлением, отличающиеся концентрацией компенсирующей примеси марганца. При этом концентрация электрически активного марганца в образцах изменялась в интервале $N_{\text{Mn}} = 1 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Результаты исследования показали, что, когда концентрация марганца $N_{\text{Mn}} < 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, независимо от концентрации исходного бора и удельного сопротивления компенсированных образцов Si(B,Mn) автоколебания тока не наблюдаются. Верхняя граница концентрации марганца $N_{\text{Mn}} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответствует максимальной предельной растворимости марганца в кремнии. Таким образом, установлены граничные концентрации марганца, при которых наблюдаются автоколебания тока в образцах Si(B,Mn): концентрация марганца должна находиться в интервале $N_{\text{Mn}} = 2 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. На рис. 1 представлена зависимость пороговой напряженности электрического поля E_{th} (минимальное значение напряженности электрического поля, при котором наблюдаются стабильные и регулярные автоколебания) от концентрации марганца. При этом во всех исследованиях условия эксперимента, удельное сопротивление образ-

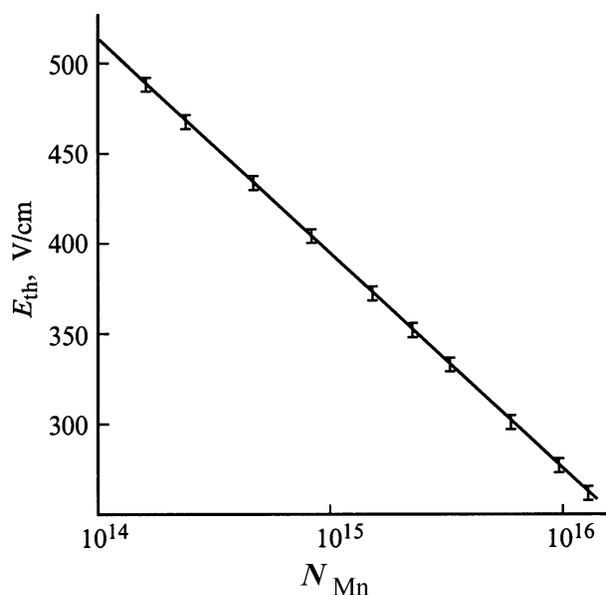


Рис. 1. Зависимость порогового поля возбуждения автоколебаний тока от концентрации марганца при одинаковых условиях в образцах Si(B,Mn) с $\rho = 8 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

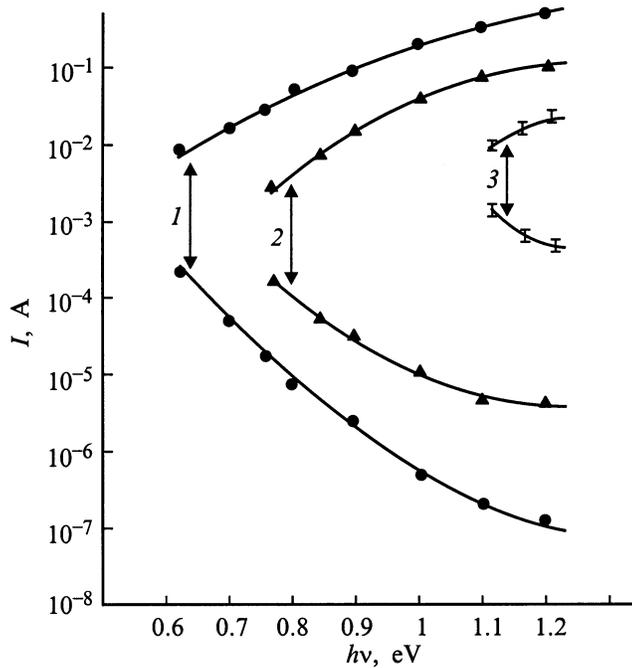


Рис. 2. Зависимость амплитуды автоколебаний тока I (показаны максимальные и минимальные значения тока) от энергии фотонов $h\nu$ в образцах Si(B,Mn) при одинаковых условиях. N_{Mn} , см^{-3} : 1 — $2 \cdot 10^{16}$, 2 — $2 \cdot 10^{15}$, 3 — $2 \cdot 10^{14}$.

цов и их геометрические размеры были одинаковыми ($\rho = 8 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $4 \times 8 \times 1 \text{ мм}^3$). Как видно из рисунка, с ростом концентрации атомов марганца значение пороговой напряженности электрического поля E_{th} монотонно уменьшается. Эту зависимость можно описать выражением $E_{\text{th}} = E_0 [1 + \alpha \ln(N_{\text{Mn}}/N_{\text{Mn}}^0)]$, где E_0 — пороговая напряженность электрического поля при минимальной для наблюдения автоколебаний концентрации марганца $N_{\text{Mn}}^0 = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, N_{Mn} — заданная концентрация марганца, α — коэффициент, в нашем случае $\alpha = 8.5 \cdot 10^{-2}$. Такая зависимость имеет место и для образцов с другим удельным сопротивлением, что дает возможность использовать полученное выражение для определения значения пороговой напряженности электрического поля в зависимости от концентрации марганца. Таким образом, при увеличении концентрации марганца от $2 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ E_{th} уменьшается более чем в 2 раза, т.е. с увеличением концентрации марганца можно возбуждать автоколебания при более низких электрических полях.

Результаты исследования спектральной области существования автоколебаний тока в компенсированном кремнии в зависимости от концентрации компенсирующего марганца приведены на рис. 2. При этом электрическое поле, температура, удельное сопротивление и мощность монохроматического излучения были одинаковыми. Как видно из рисунка, с ростом концентрации марганца спектральная область возбуждения автоколебаний тока существенно расширяется. Если в образ-

цах Si(B,Mn) с максимальной концентрацией марганца ($2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) автоколебания тока возбуждаются при энергии фотонов $h\nu = 0.62 \text{ эВ}$, то в образцах с таким же удельным сопротивлением и концентрацией марганца $N_{\text{Mn}} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ для возбуждения автоколебаний образцы должны освещаться излучением с энергиями фотонов $h\nu \geq 1.1 \text{ эВ}$. Следует отметить, что при этом с ростом концентрации марганца амплитуда автоколебаний тока существенно увеличивается (рис. 2, кривая 1), и амплитуда также растет с увеличением энергии монохроматического излучения. В отличие от других материалов, в компенсированном кремнии, легированном марганцем, регулярные и стабильные автоколебания тока наблюдаются при освещении не только монохроматическим светом, но и интегральным фоновым светом. Поэтому представляет интерес определение области интегрального света для наблюдения автоколебаний тока. При этом также исследовались образцы с одинаковым удельным сопротивлением с различной концентрацией компенсирующего марганца, полученные на основе исходного кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 100, 10, 4.5, 2, 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Как показали результаты исследования (рис. 3), с ростом концентрации марганца существенно расширяется область интенсивности интегрального освещения существования автоколебаний тока. С ростом концентрации марганца автоколебания наблюдаются при достаточно низкой интенсивности интегрального освещения, при этом существенно увеличивается амплитуда автоколебаний тока. Во всех случаях с ростом концентрации

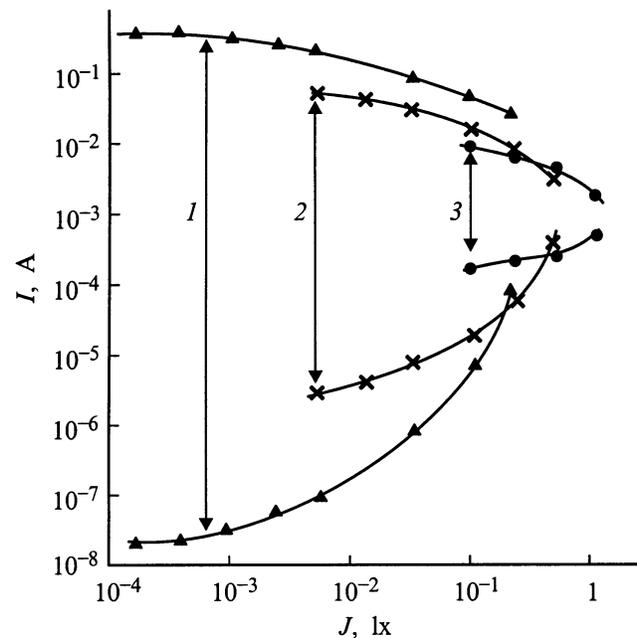


Рис. 3. Зависимость амплитуды автоколебаний тока I (показаны максимальные и минимальные значения тока) от интенсивности интегрального света J в образцах Si(B,Mn) при различной концентрации марганца N_{Mn} , см^{-3} : 1 — $2 \cdot 10^{16}$, 2 — $2 \cdot 10^{15}$, 3 — $2 \cdot 10^{14}$.

марганца частотная область автоколебаний существенно расширяется в сторону низких частот.

Как показали результаты исследования, температурная область существования автоколебаний тока существенно не зависит от концентрации марганца, т. е. автоколебания во всех случаях наблюдаются в интервале температур $T = 77 \div 180$ К.

Таким образом, определены основные термодинамические условия возбуждения регулярных и стабильных автоколебаний тока в компенсированном кремнии Si(B,Mn) в зависимости от концентрации компенсирующей примеси марганца. При контролируемом получении кремния, легированного марганцем, с необходимыми параметрами это дает возможность создание на его основе твердотельных генераторов.

Список литературы

- [1] Б.В. Карнилов, А.В. Анфимов. ФТТ, **8**(12), 3420 (1966).
- [2] С.Б. Бумялене, Ю.К. Пожела. ФТП, **20**(7), 1327 (1986).
- [3] А.Ш. Абдинов, В.К. Мамедов. ФТП, **14**(4), 754 (1980).
- [4] В.В. Антонов, Л.И. Кац. ФТП, **16**(6), 1050 (1982).
- [5] Ш.И. Аскарлов, М.К. Бахадырханов, Н.Ф. Зикриллаев, А.А. Турсунов. ФТП, **20**(4), 781 (1986).
- [6] Ю.И. Завадский, Б.В. Карнилов. ФТП, **4**(11), 2115 (1970).
- [7] М.К. Бахадырханов, Н.Ф. Зикриллаев, А.А. Турсунов, Ш.И. Аскарлов. ДАН РУз., № 5, 26 (1985).
- [8] С.П. Кальвенас, А.А. Пучинкас. ФТП, **13**(9), 1752 (1979).
- [9] Н.Ф. Зикриллаев. Автореф. канд. дис. (Ташкент, 1989).

Редактор Л.В. Шаронова

Excitation control and parameters of self-sustained current oscillations in a compensated manganese-doped silicon

M.K. Bakhadirhanov, Kh. Azimkhuzhaev,
N.F. Zikrillaev, A.B. Sabdullaev, E. Arzikulov

Tashkent State Technical University,
700095 Tashkent, Uzbekistan