

ХВАСТУНОВ Н. Н., ГОЛОВАТЮК С. Е., ШОРОХОВ А. В.

**СТАБИЛИЗАЦИЯ УСИЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В
СВЕРХРЕШЕТКЕ В НАКЛОННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ¹**

Аннотация. В данной работе мы демонстрируем, что дифференциальная проводимость сверхрешетки в присутствии наклонного магнитного поля может быть представлена в виде удобной для анализа разностной производной, позволяющей только по статической вольт-амперной характеристике (ВАХ) сверхрешетки определить возможность усиления высокочастотного излучения и определить сам коэффициент усиления.

Ключевые слова: сверхрешетка, усиление, магнитное поле, разностная производная.

**KHVASTUNOV N. N., GOLOVATYUK S. E., SHOROKHOV A. V.
STABILIZATION GAIN OF HIGH-FREQUENCY RADIATION IN
SUPERLATTICE IN TILTED MAGNETIC FIELD**

Abstract. In this paper we demonstrate that the differential conductivity of superlattice in a tilted magnetic field may be represented in the form of a difference derivative that is convenient for analysis. It allows determining the possibility of gaining of the high-frequency radiation and the gain coefficient.

Keywords: superlattice, gain, magnetic field, difference derivative.

Полупроводниковая сверхрешетка, помещенная в постоянное продольное электрическое поле напряженностью E_0 , теоретически может усиливать высокочастотное электромагнитное излучения вплоть до частот порядка блоховской частоты $\omega_B = edE_0/\hbar$ (d – период сверхрешетки, e – заряд электрона) [1], которая для типичных сверхрешеток может лежать в ТГц частотном диапазоне. Физической причиной данного эффекта являются блоховские осцилляции электронов внутри одной минизоны. При этом экспериментально до сих пор не удалось в этом случае получить какого-либо существенного усиления внешнего сигнала из-за возникающих в режиме усиления нестабильностей, связанных с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) [2]. Одним из путей решения данной проблемы может являться модификация схемы усиления, в том числе путем приложения к системе внешнего магнитного поля. В частности, как показано в недавней работе [3], сверхрешетка, помещенная во взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля, может работать как усилитель и генератор высокочастотного излучения на отрицательных электронных

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания (проект 2665).

массах типа NEMAG. Однако усиление возможно и в случае, когда магнитное поле наклонено под углом к оси сверхрешетки. В этом случае, как численно показано в работе [4], возможна стабилизация системы в окрестностях циклотрон-штарковских резонансов. В данной работе мы подтверждаем данный численный анализ аналитическими расчетами и показываем простой геометрический путь определения возможности усиления и коэффициента усиления, исходя из анализа только статической ВАХ сверхрешетки.

Следуя [5], запишем Фурье-компоненту плотности тока через сверхрешетку, помещенную в постоянное электрическое поле E_0 , направленное вдоль оси сверхрешетки (ось x), и магнитное поле напряженностью H_0 , направленное под углом α к оси y , в случае, когда на сверхрешетку действует переменное электрическое поле $E_{pr} = E_1 \cos(\omega_1 t)$:

$$j_s = \frac{\nu}{2i} j_0 \sum_{n,l=-\infty}^{\infty} I_n \left(mT \left(\frac{\omega_{\perp} d}{\hbar \omega_{\parallel}} \right)^2 \right) J_l(\beta_1) J_{l+s}(\beta_1) \left[\frac{1}{\nu - i(\omega_B - n\omega_{\parallel} + l\omega_1)} - \frac{1}{\nu + i(\omega_B - n\omega_{\parallel} - l\omega_1)} \right] \quad (1)$$

где ν^{-1} – время релаксации, $j_0 = \frac{eN\Delta d}{2\hbar} \frac{I_1(\Delta/2T)}{I_0(\Delta/2T)} \exp \left[-mT \left(\frac{\omega_{\perp} d}{\hbar \omega_{\parallel}} \right)^2 \right]$, N – концентрация электронов, Δ – ширина минизоны, $\beta_1 = \Omega_1/\omega_1$, $\Omega_1 = edE_1/\hbar$, $I_k(x)$ – модифицированная функция Бесселя k -го порядка, $J_k(x)$ – функция Бесселя k -го порядка, T – температура в энергетических единицах, m – масса электрона, ω_{\parallel} и ω_{\perp} – составляющие $\vec{\omega} = e\vec{H}_0/mc$ вдоль и перпендикулярно оси сверхрешетки. Заметим, что в [5] существуют неточности в формуле (1).

Вычислим нулевую гармонику тока, то есть постоянный ток через сверхрешетку. В этом случае необходимо положить $s = 0$, $l = 0$. В результате из (1) получим

$$j_{dc} = \nu j_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n \left(mT \left(\frac{\omega_{\perp} d}{\hbar \omega_{\parallel}} \right)^2 \right) \frac{\omega_B - n\omega_{\parallel}}{\nu^2 + (\omega_B - n\omega_{\parallel})^2} \quad (2)$$

Отметим, что в данной конфигурации системы происходит гибридизация циклотронных и блоховских осцилляций, что дает дополнительный пик на статической ВАХ (Рис.1).

Рассмотрим случай слабого переменного сигнала, тогда $\beta_1 \ll 1$ и для вычисления гармоники тока необходимо взять только следующие комбинации индексов s и l : $s = -1; l = 1$, $s = 1; l = -1$:

$$j_{ac} = \frac{\beta_1}{2} \frac{v}{2i} j_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n \left(mT \left(\frac{\omega_{\perp} d}{\hbar \omega_{\parallel}} \right)^2 \right) \left[\frac{2i(\omega_B - n\omega_{\parallel} + \omega_1)}{v^2 + (\omega_B - n\omega_{\parallel} + \omega_1)^2} - \frac{2i(\omega_B - n\omega_{\parallel} - \omega_1)}{v^2 + (\omega_B - n\omega_{\parallel} - \omega_1)^2} \right] \quad (3)$$

Из сравнения (2) и (3) следует важный результат: дифференциальная проводимость сверхрешетки $\sigma_d = dj_{ac}/dE_1$, а, следовательно, и коэффициент поглощения (усиления), могут быть выражены в виде конечной разности от плотности постоянного тока

$$\sigma_d = \frac{eN}{\hbar} \frac{j_{dc}(\omega_B + \omega_1) - j_{dc}(\omega_B - \omega_1)}{2\omega_1} \quad (4)$$

Данная формула представляет собой удобный инструмент анализа усиления, поскольку только из анализа статической ВАХ сверхрешетки, экспериментальное определение которой не представляет больших сложностей, можно предсказать саму возможность усиления слабого сигнала и его величину в слабосигнальном приближении. Это обстоятельство дает возможность заранее подобрать необходимые для усиления параметры системы.

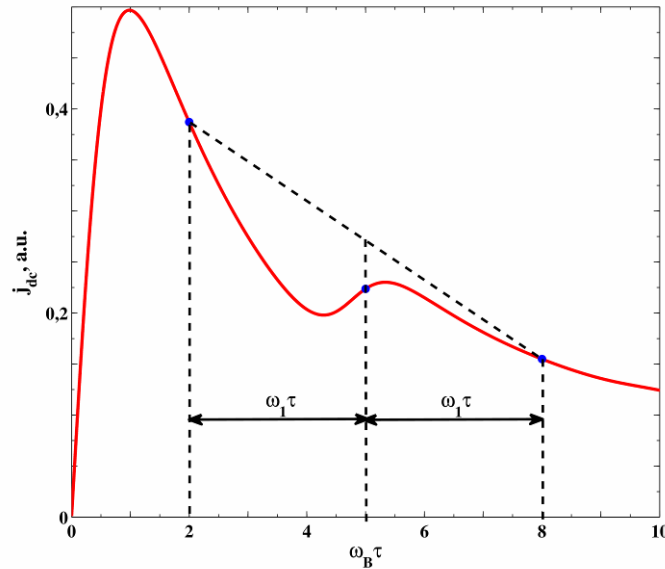


Рис. 1. Постоянный ток через сверхрешетку при $\omega_1 \tau = 4,75$.

Как видно из Рис.1, если выбрать рабочую точку на ВАХ в области положительной дифференциальной проводимости (ПДП), обеспечивающей стабильность системы, то возможность усиления определяется наклоном отрезка, соединяющего точки с координатами $\Omega_0 + \omega_1$ и $\Omega_0 - \omega_1$, а величина усиления с точностью до константы равна отношению разницы значений постоянного тока в данных точках к ширине данного интервала $2\omega_1$. На Рис.1 наклон отрезка отрицателен, поэтому при выборе рабочей точки на ВАХ в месте,

показанном на данном рисунке, будет происходить усиление, что подтверждается численным анализом проводимости (Рис.2)

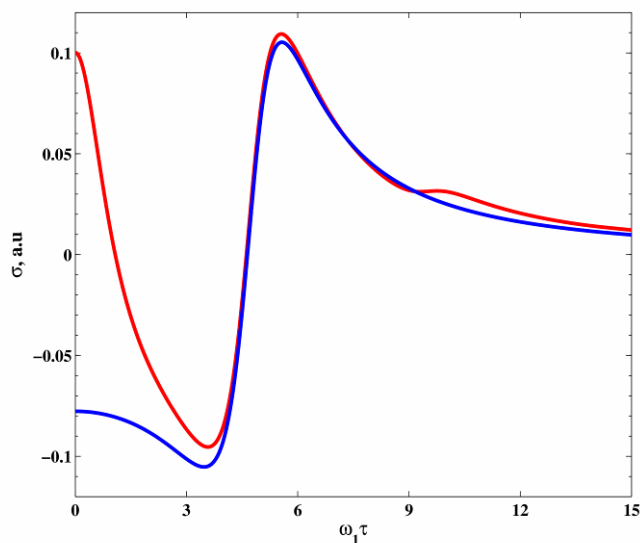


Рис. 2. Проводимость сверхрешетки как функция частоты пробного поля при $\omega_{\parallel}\tau = 4,75$.

На рис. 2 показано, что при выборе рабочей точки как показано на Рис.1, возникает усиление высокочастотного излучения (красная линия). Синяя линия соответствует проводимости в отсутствие магнитного поля. Несмотря на то, что и в этом случае проводимость будет отрицательной, в данном случае усиление будет нестабильным, так как рабочая точка на статической ВАХ попадает в область ОДП (Рис.3).

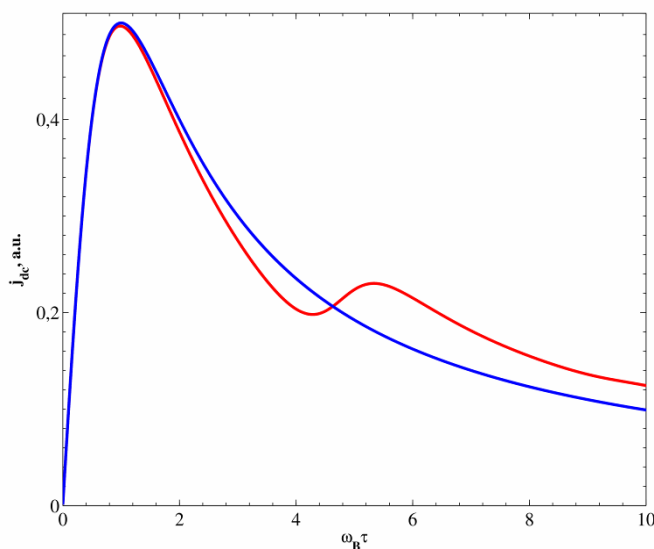


Рис. 3. Статическая ВАХ сверхрешетки при отсутствии магнитного поля (синяя линия) и при наличии магнитного поля (красная линия). Видно, что область ПДП в районе второго пика присутствует только в системе с магнитным полем.

Таким образом, развитый метод анализа статической ВАХ сверхрешетки является простым и наглядным геометрическим методом определения условий достижения усиления высокочастотного, в том числе ТГц, излучения в отсутствие разрушающих усиление нестабильностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ктиторов С. А., Симин Г. С., Синдаловский В. Я. Влияние брэгговских отражений на высокочастотную проводимость плазмы твердого тела // Физика твердого тела. – 1971. – Т. 13. – С. 2230.
2. Игнатов А. А., Шашкин В. И. Блоховские осцилляции электронов и неустойчивость волн пространственного заряда в полупроводниковых сверхрешетках // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1987. – Т. 93. – С. 935.
3. Шорохов А. В., Пятаев М. А., Хвастунов Н. Н. и др. Физические принципы усиления электромагнитного излучения на отрицательных электронных массах на основе полупроводниковой сверхрешетки // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2014. – Т. 100. – С. 870.
4. Nyart T., Mattas J., Alekseev K.N. Model of the Influence of an External Magnetic Field on the Gain of Terahertz Radiation from Semiconductor Superlattices // Physical Review Letters. – 2009. – Vol.103. – P. 117401.
5. Басс Ф. Г., Зорченко В. А., Шашора В. И. К теории гальваномагнитных и высокочастотных явлений в полупроводниках со сверхрешеткой // Физика и техника полупроводников. – 1981. – Т. 15. – № 3. – С. 459.