

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.41

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ
И АСИММЕТРИЧНЫЕ СПЕКЛЫ

Ю.В. Васильев, А.В. Козарь, Е.Ф. Курицына, А.Е. Лукьянов

(кафедра общей физики, кафедра радиофизики,
кафедра физической электроники)

Экспериментально обнаружено возникновение односторонне ориентированных асимметричных спеклов при освещении анизотропной поверхности металлической грани сфокусированным лазерным пучком. Это объясняется одновременным резонансным возбуждением двух мод попарно связанных поверхностных плазмон-поляритонов. Одна мода возбуждается на волнистой поверхности полубесконечной металлической отражательной дифракционной решетки с глубоким хаотическим профилем, другая — на макроскопически прямом крае решетки, который перпендикулярен канавкам профиля решетки.

В работе [1] показано, что узкая металлическая полоска с анизотропно шероховатой поверхностью, которую освещает пучок лазерного излучения, диффузно рассеивает излучение и формирует на удаленном экране пятнистую дифракционную картину (спеклы). Самый яркий фрагмент картины структурирован, так как анизотропно шероховатая полоска действует как линейная хаотическая отражательная дифракционная решетка с неидеальными штрихами. Апертура пучка влияет на минимальный масштаб дискретизации картины согласно параметрам информационных ячеек Габора [2]. Высокая информационная чувствительность картин спеклов помогает анализировать сложные ситуации в лазерном эксперименте, когда одновременно несколько физических механизмов ответственны за формирование результирующего оптического поля с богатым набором пространственных частот [3].

Бесконечная идеально гофрированная металлическая поверхность действует как линейная решетка и отражает в разные дифракционные порядки электромагнитные волны падающего лазерного излучения частоты ω . Пространственный спектр дифрагированного излучения претерпевает изменения при лазерном возбуждении на решетке поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) [4–7]. Слабая статистическая шероховатость поверхности усложняет как поведение ППП, так и рассеяние излучения решеткой [8]. Вызывает интерес формирование картины спеклов при лазерном освещении сильно шероховатой, механически рифленой металлической поверхности с макроскопически прямым краем, который перпендикулярен канавкам на поверхности металла.

Цель работы — экспериментальное исследование краевых эффектов при рассеянии лазерного излуче-

ния на полубесконечной хаотически гофрированной шероховатой металлической поверхности, прямой край которой локально освещен сфокусированным пучком линейно поляризованного излучения.

Принципиальная оптическая схема эксперимента на голографической измерительной установке УИГ-22М показана на рис. 1. Аргонный лазер типа ЛГН-503 генерирует гауссов пучок когерентного излучения с длиной волны $\lambda = 514.5$ нм (эффективный диаметр пучка $D = 2.5$ мм, пространственная

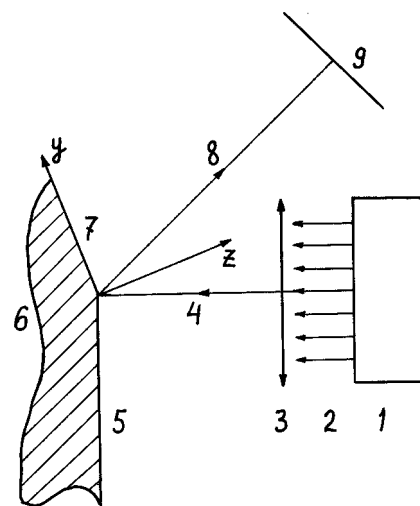


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема эксперимента: 1 — лазер, 2 — лазерный пучок, 3 — тонкая сферическая линза, 4 — ось сфокусированного лазерного пучка, 5 — плоскость освещенной поверхности пластины лезвия безопасной бритвы, 6 — фрагмент поперечного сечения пластины лезвия у основания режущей кромки, 7 — плоскость освещенной поверхности первой грани режущей кромки лезвия (угол наклона к плоскости пластины составляет $\sim 5^\circ$), 8 — направление френелевского зеркального отражения грани, 9 — фотографическая рамка голографической установки

мода TEM_{00}). Собирающая сферическая линза с фокусным расстоянием 42 см уменьшает диаметр пучка до эффективной величины $d \approx 0.05$ мм в фокальной плоскости линзы [9]. Ось сфокусированного пучка перпендикулярна плоской поверхности металлической пластины (лезвие безопасной бритвы шириной 22 мм), которая совмещена с фокальной плоскостью линзы. Поверхность первой грани режущей кромки лезвия (в дальнейшем — грани) образует угол $\alpha \approx 5^\circ$ по отношению к поверхности пластины (длина грани 37 мм, средняя ширина $b \approx 0.3$ мм). Поверхности грани и пластины лезвия являются сторонами клина с тупым углом при вершине. Макроскопически прямой край грани (вертикальное ребро клина) расположен вдоль диаметра пучка d . Ребро клина направлено вдоль оси x декартовой системы координат xuz , ось y которой лежит в плоскости грани, а ось z перпендикулярна этой плоскости.

Пучок s -поляризованного излучения падает на поверхность грани в плоскости yz под малым углом $\theta \approx \alpha$. Тангенциальная составляющая волнового вектора падающего излучения на плоскости грани (k_t) ориентирована вдоль оси y , величина $k_t \ll \omega/c$, где c — скорость света в вакууме. Излучение, рассеянное вблизи направления френелевского зеркального отражения грани, регистрируется на расстоянии $L = 1$ м на плоском листе фотобумаги, укрепленном в фотографической рамке голографической установки с входным окном 9×12 см (длинная сторона окна вертикальна).

Типичный пример картины спеклов на листе фотобумаги в негативном изображении показан на рис. 2. Малые темные пятна, хаотически разбросанные по листу, — это обычные спеклы от шероховатой поверхности лезвия в апертуре освещающего пучка [10]. Вертикальная статистически симметричная полоса (в оригинале шириной около 1.5 см) — это изображение кластерной спекл-структуры [1]. Новое в картине спеклов — односторонне ориентированные асимметричные спеклы, которые имеют вид горизонтальных узких диффузных полосок справа от кластерной спекл-структуры. Физическая причина возникновения асимметричных спеклов — возбуждение ППП на поверхности грани и на прямом крае грани.

Поверхность грани, образованная в процессе изготовления бритвы, при заточке лезвия в поперечном направлении абразивным инструментом с крупным зерном приобретает особые свойства. На микрофотографии (рис. 3), полученной в растровом электронном микроскопе JSM-U3 на площади обзора 0.3×0.3 мм, хорошо виден фрагмент исходной шероховатой поверхности пластины (слева) и грубой, сильно анизотропной шероховатой поверхности грани (справа).

Рифленая поверхность грани профилирована хаотично и негладко. Черные горизонтальные полосы

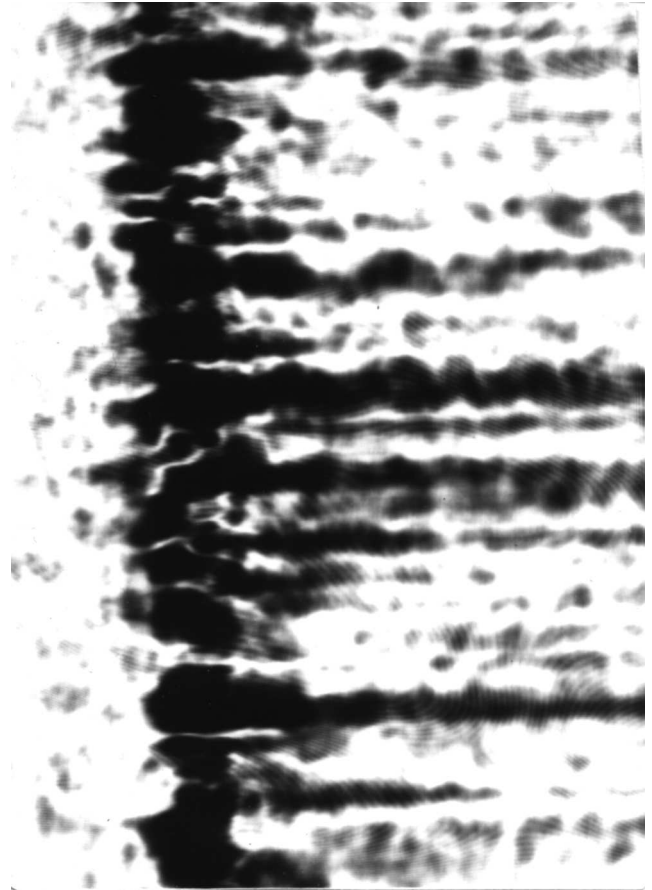


Рис. 2. Негативное изображение картины спеклов, полученной при освещении сфокусированным лазерным пучком ребра и двух сторон поверхности клина (с тупым углом при вершине) у основания режущей кромки лезвия безопасной бритвы

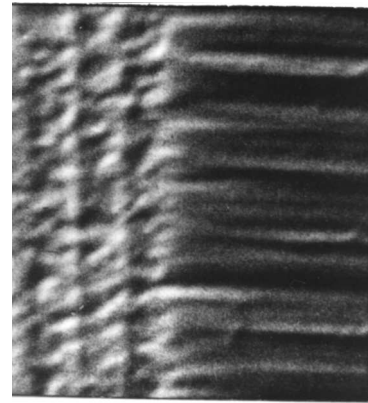


Рис. 3. Микрофотография фрагмента поверхности двух сторон клина (с тупым углом при вершине) у основания режущей кромки лезвия безопасной бритвы

на рис. 3 — это длинные, глубокие бороздки на поверхности грани со средней глубиной $\Delta z \gg \lambda$. Склоны бороздок крутые, часто обрывистые. Между глубокими бороздками расположены площадки поверхности грани, на которых процарапаны длинные мелкие канавки с пологими склонами.

Пространственный спектр двумерного рельефа поверхности грани содержит фурье-составляющие

как с низкими пространственными частотами в плоскости грани, $g_{x,y} \ll \omega/c$, так и с высокими частотами, $g \approx \omega/c$. Низкочастотные фурье-компоненты спектра определяют радиационную отражательную дифракцию и приводят к формированию обычных поверхностных спеклов и кластерной спекл-структуры, представленной на рис. 2.

Высокочастотные фурье-компоненты спектра поверхности могут обеспечить выполнение условий для возбуждения падающим лазерным излучением с тангенциальной составляющей волнового вектора k_t нерадиационных ППП с большим по модулю волновым вектором k в плоскости грани: $k = k(\omega) > \omega/c$. На решетке синусоидального профиля пространственной частоты $g_x \approx \omega/c$ падающее излучение резонансно возбуждает ППП, если выполняется соотношение $(g_x)^2 + (k_t)^2 = k^2$. Вследствие взаимодействия ППП с волновыми векторами \mathbf{k} и $\mathbf{k} - \mathbf{g}_x$ в результате рассеяния на решетке происходит расщепление кривых дисперсии $k(\omega)$ на две связанные моды для двух пар связанных попарно ППП, причем ветви мод разделены в k -пространстве щелью δk_y [8]. Вторая гармоника профиля несинусоидальной решетки с частотой $2g_x$ усиливает эффект попарной связи ППП [5] и расщепления ветвей мод [7, 8].

В работе [7] показано, что s -поляризованное излучение подходящей величины проекции k_t вдоль канавок резонансно возбуждает на бесконечной решетке с глубоким гладким профилем ППП одной только верхней ветви дисперсионных кривых, но не в состоянии возбудить ППП ветви ниже щели. В нашем эксперименте происходит возбуждение ППП обеих ветвей, так как резкий прямой край полубесконечной решетки имеет в своем двумерном пространственном спектре кроме частоты g_x и частоты g_y . Это приводит к тому, что на освещенном прикраевом участке поверхности обеспечивается одновременное выполнение двух соотношений: $(g_x)^2 + (k_t)^2 = (k_1)^2$ и $(g_x)^2 + (k_t - g_y)^2 = (k_2)^2$, где $k_1 > k_2$ (k_1 характеризует верхнюю ветвь дисперсионных кривых, а k_2 — нижнюю).

Нерадиационные ППП при взаимодействии с решеткой, для которой волновой вектор обратной решетки приблизительно равен g_x , становятся радиационными и излучают кроме фотонов с тангенциальной составляющей k_t также и фотоны с меньшей величиной тангенциальной составляющей k_y ($k_y < k_t$). Резонансное возбуждение обеих ветвей ППП на решетке грани с прямым краем приводит к появлению асимметричных спеклов (справа от кластерной спекл-структуры на рис. 2) в той области информационной диаграммы Габора, которая отвечает информационным ячейкам с разрешенными значениями проекций волновых векторов рассеянного излучения на плоскости регистрации: $\Delta k_x \approx 2\pi/d$, $k_y < k_t = (\omega/c) \sin \theta$.

Литература

1. Васильев Ю.В., Козарь А.В., Курицына Е.Ф., Лукьянов А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2001. № 4. С. 60 (Moscow University Phys. Bull. 2001. No. 4. P. 70).
2. Gabor D. // Progr. in Opt. 1961. 1. P. 109.
3. Васильев Ю.В., Козарь А.В., Курицына Е.Ф., Лукьянов А.Е. // Опт. и спектр. 1998. 85, № 6. С. 1001.
4. Bonch-Bruевич А.М., Libenson М.Н., Makin V.S., Trubaev V.V. // Opt. Eng. 1992. 31, No. 4. P. 718.
5. Okorkov V.N., Panchenko V.Ya., Russkikh B.V. et al. // Opt. Engineering. 1994. 33, No. 10. P. 3145.
6. Либенсон М.Н. // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 10. С. 92.
7. Watts R.A., Preist T.W., Sambles J.R. // Phys. Rev. Lett. 1997. 79, No. 20. P. 3978.
8. Рейтер Х. // Поверхностные поляритоны / Под ред. В.М. Аграновича, Д.Л. Миллса. М.: Наука, 1985. С. 227.
9. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998.
10. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980.

Поступила в редакцию
06.02.02