

Diss. ETH Nr. 13648

**PHOTON DRAG SPECTROSCOPY OF THE
TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS IN
GaAs/AlGaAs QUANTUM WELL SYSTEMS**

A DISSERTATION

submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH

for the degree of

DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

STEPHAN GRAF

Dipl. Phys. ETH Zürich
born on September 1st, 1969
citizen of Buus (BL)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. W. Bächtold, examiner
Prof. Dr. K. Ensslin, co-examiner
Dr. H. Sigg, co-examiner

Zürich, ETHZ, 2000

Summary

The subject of this thesis is the investigation of the photon drag effect and its application to examine current relaxation processes in GaAs/AlGaAs quantum well systems. The photon drag is a current generated in the plane of a two-dimensional electron gas due to the intersubband absorption of infrared light. It consists of two contributions, the first is proportional to the direct momentum transfer from photons (radiation pressure) to the electron system and the second is a consequence of velocity-selecting excitation (Doppler effect) and the difference of current relaxation times in the ground and excited subband. For the understanding of this so-called resonant part one has to consider that the excited electron leaves an empty state (hole) in the ground subband. Therefore, two currents have to be taken into account, which change sign when the excitation frequency is tuned over the resonance. The relaxation times of electrons and holes are in general not equal, which means that one current dominates. From the spectral dependence of the photon drag current, especially of the resonant part, information on the intersubband relaxation processes can be obtained.

Only with the accessibility of infrared free electron lasers the wavelength could be tuned easily over the whole intersubband resonance and enabled the here presented detailed study. The light source used by us was FELIX (Free Electron Laser for Infrared eXperiments) of the FOM-institute for Plasmaphysics 'Rijnhuizen' in Nieuwegein, the Netherlands.

An analysis of the spectral response is presented for different doping schemes in AlGaAs/GaAs quantum well systems. The influence of the subband selective scattering by a δ -doping is explored, which demonstrates that the photon drag spectral response allows the determination of the momentum relaxation time ratio of the electrons in the ground and excited subbands. PD experiments performed as a function of temperature and intensity demonstrate that the relaxation time ratio is surprisingly constant over a large temperature range. We explain this result by the fast thermalization of the electron gas among the different subbands. The variation of the ratio with intensity can be attributed to heating of the electron gas, of which the temperature exceeds 1000 K at saturation intensity. The quantitative agreement between the photon drag signal and the estimation confirms the validity of the simple model employed.

We compared in detail the photon drag effect and the absorption and could demonstrate the role of collective effects in the intersubband resonance. In our study the peak absorption at room temperature is found to be blueshifted from the photon drag resonance by as much as 33 cm^{-1} . An explanation why this difference gives directly the depolarization shift is given by the fact that the resonant photon drag current is driven by the Doppler effect, which is a single particle process.

The investigations on optical rectification have been inspired by the huge non-linear optical effects that asymmetric quantum well structures exhibit. We discuss the efforts that have been performed to observe this effect and to eventually use it. A first approach towards the realization of the quantum well optical rectification detector is made by the achievement of a travelling-wave electrical pulse generator using pure nonresonant instantaneous optical rectification in bulk GaAs. The high-frequency coupling of the optical rectification polarization into the microstrip transmission line is verified by angle resolved measurements.

Zusammenfassung

Das Thema dieser Arbeit ist die Untersuchung des Photon-Drag Effektes und seiner Anwendung zur Untersuchung von Stromrelaxations-Prozessen in GaAs/AlGaAs Quantentopfstrukturen. Der Photon-Drag Effekt ist ein durch Intersubbandabsorption generierter Strom, der in der Ebene des zweidimensionalen Elektronengases fließt. Dieser setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, der erste ist proportional zum Impulsübertrag von Photonen aufs Elektronensystem (klassischer Strahlungsdruck), der zweite folgt aus der Geschwindigkeitsselektiven Anregung (Doppler Effekt) und dem Unterschied der Stromrelaxationszeiten des ersten und zweiten Subbands. Zum Verständnis dieses sogenannten resonanten Anteil muss man beachten, dass das angeregte Elektron einen unbesetzten Zustand (Loch) im Grundzustand hinterlässt. Es müssen daher zwei Ladungsträgerströme betrachtet werden, die ihr Vorzeichen ändern, wenn die Anregungsfrequenz über die Resonanz gestimmt wird. Üblicherweise sind die Relaxationszeiten für Elektronen und Löcher nicht gleich, d.h., ein Teilstrom dominiert. Durch die spektrale Abhängigkeit des Photon-Drag-Stromes, im besonderen des resonanten Teiles, können Informationen über Stromrelaxationsprozesse in den verschiedenen Subbändern gewonnen werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellte ausführliche Untersuchung der Photon-Drag-Spektren wurde erst durch den Zugang zu einem Freie-Elektronen-Laser möglich, mit welchem die Wellenlänge über den vollständigen Bereich der Intersubbandresonanz variiert werden kann. Die von uns verwendete Infrarot-Lichtquelle war FELIX (Freie-Elektronen-Laser für Infrarot Experimente) des FOM-Institutes für Plasma-physics 'Rijnhuizen' in Nieuwegein, den Niederlanden.

Eine Analyse der Photon-Drag-Spektren wird für unterschiedliche Dotierungsprofile in den GaAs/AlGaAs Quantentopfsystemen und als Funktion der Temperatur wie auch der Intensität präsentiert. Durch eine δ -Dotierung, welche die Streuung in den Subbänder selektiv beeinflusst, wurde demonstriert, dass die spektrale Antwort des Photon-Drag Effektes eine Bestimmung des Verhältnisses der Relaxationszeiten des ersten und zweiten Subbandes erlaubt. Überraschenderweise bleibt dieses Verhältnis über eine grosse Temperaturspanne relativ konstant. Wir erklären dieses Resultat durch die schnelle Thermalisierung des Elektronengases zwischen den Subbändern. Bei hohen Intensität ändert sich das Verhältnis, was der hohen Temperatur des Elektronengases zugeschrieben

werden kann, welche Werte von 1000 K bei Sättigungsintensität übersteigt. Die quantitative Übereinstimmung des gemessenen Photon-Drag Signales und der in dieser Arbeit gegebenen Schätzung, bestätigt die Gültigkeit des verwendeten Modells.

Beim detaillierten Vergleich des Photon-Drag Effektes und der Absorption konnte der Einfluss kollektiver Effekten auf die Intersubbandresonanz nachgewiesen werden. In unserer Studie, war das Absorptionsmaximum bei Raumtemperatur gegenüber der Photon-Drag-Resonanzposition um 33 cm^{-1} blauverschoben. Eine intuitive Erklärung, warum dieser Unterschied der Depolarisierung-Verschiebung zuzuschreiben ist, ergibt sich aus dem Umstand, dass der resonante Photon-Drag Strom durch den Doppler Effekt angetrieben wird, welcher ein Einteilchenprozess ist.

Stimuliert durch die sehr grossen nichtlinearen optischen Effekte, die asymmetrische Quantentopfstrukturen aufweisen, haben wir Experimente zur Optischen-Gleichrichtung durchgeführt. Wir diskutieren die Versuche, die unternommen wurden, um diesen Effekt zu beobachten und nutzbar zu machen. Als ersten Schritt hin zu einem Gleichrichtungs-Detektor aus Quantentopfstrukturen realisierten wir einen elektrischen Impulsgenerator, der auf der nichtresonanten nichtlinearität (χ_0^2) im Volumen GaAs basiert. Die Hochfrequenzeinkopplung in den Mikrostreifenleiter wurde durch Winkelaufgelöste Messungen überprüft.